



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Masyvių betoninių konstrukcijų konstrukciniai ir technologiniai sprendimai

Baigiamasis magistro projektas

Liutauras Šarkus

Projekto autorius

Doc. Dr. Jolanta Šadauskienė

Vadovė

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Masyvių betoninių konstrukcijų konstrukciniai ir technologiniai sprendimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Liutauras Šarkus

Projekto autorius

Doc. Dr. Jolanta Šadauskienė

Vadovė

Prof. Dr. Žymantas Rudžionis

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Liutauras Šarkus

Masyvių betoninių konstrukcijų konstrukciniai ir technologiniai sprendimai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Liutauras Šarkus

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: 6211EX008 STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):
MASYVIŲ BETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ KONSTRUKCINIAI
IR TECHNOLOGINIAI SPRENDIMAI

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: ST18-F-09-1

(lietuvių k.):
Masyvių betoninių konstrukcijų konstrukciniai ir technologiniai sprendimai

(anglų k.):
Structural and Technological Solutions for Massive Concrete Structures

Pradiniai duomenys darbui:

IŠ UAB „KELPROJEKTAS“ GAUTI OBJEKTO ATRAMŲ BRĖŽINIAI

Baigiamojo projekto dalys:

	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	x
Analitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Skaitiniai tyrimai	x
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį):

**KONSULTACIJOS NUMATOMOS PIRMADIENIAIS 09:30;
DARBAS VYKDOMAS KARTU SU UAB „KELPROJEKTAS“, BETONO SUDĖTIS YRA UAB
„KELPROJEKTAS“ KONFIDENCIALI INFORMACIJA.**

Vadovas:
(indėlis __100__ %)

Doc. Dr. J. Šadauskienė
pareigos, vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu

Studentas:

Liutauras Šarkus
vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu

Šarkus Liutauras. Masyvių betoninių konstrukcijų konstrukciniai ir technologiniai sprendimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Jolanta Šadauskienė; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: Hidratacija, Cementas, Betonas, Aušinimas, Temperatūra.

Kaunas, 2022. 70 p.

Santrauka

Betonas yra viena iš plačiausiai pasaulyje naudojamų statybinių medžiagų dėl savo puikių laikančiųjų savybių. Tačiau cementas, kuris yra vienas pagrindinių betono komponentų, reaguodamas su vandeniu, hidratacijos metu sukuria didžiulį kiekį šilumos konstrukcijos viduje. Šis temperatūros kilimas tampa didžiule problema masyvioms betono konstrukcijoms, tokioms kaip hidroelektrinės, užtvankos, pamatai, sienų konstrukcijos, nes pamatui ataušti nebepakanka natūralaus vėsinimo. Kylant temperatūrai, betone atsiranda įtempiai, dėl kurių konstrukcijai kietėjant gali atsirasti terminiai įtrūkimai, kurie ženkliai įtakotų laikančiąsias savybes, stiprumą.

Šiais laikais, praktikoje yra daugybė būdų, kaip galima šią išsiskiriančią šilumą suvaldyti. Yra dvi grupės sprendimų – mineraliniai, dalį cemento keičiant priemaišomis ir taip sumažinant jo kiekį bei technologiniai, išoriniais būdais valdant išsiskiriančią šilumą, neleidžiant jai užkilti iki pavojingos ribos. Kaip pakaitalą galima naudoti kalkakmenį, lakiuosius pelenus, šlaką, taip pat efektyvu didinti užpildų dydį arba juos prieš naudojimą atvėsinti. Efektyviausi technologiniai sprendimai būtų aušinti konstrukciją per visą jos tūrį išdėstant vamzdelius, kuriais hidratacijos metu teka vanduo su gerokai žemesne temperatūra arba naudojant ledą – tokiu būdu sumažinamas ir vandens, naudojamo mišinyje kiekis.

Baigiamajame magistro darbe lyginami šie temperatūros mažinimo būdai, atliekant skaitines simuliacijas HACON 3 programos pagalba. Gavus teorinius rezultatus jie yra lyginami su praktiniais, gautais atliekant automobilinio tilto monitoringą ir stebint realų temperatūros išsiskyrimą bei raidą.

Gauti rezultatai rodo, kad efektyviausias sprendimas vėsinti pamatui yra technologinis metodas - aušinimo vamzdžių naudojimas. Simuliacijos metu gauti duomenys buvo proporcingi monitoringo metu gautiems praktiniams rezultatams. Neapsieita ir be nežymių neatitikimų – praktikoje gauta, kad temperatūra hidratacijos metu pakilo iki 63,3 °C, kiek daugiau nei dešimčia laipsnių, lyginant su teoriniais rezultatais, kur maksimali nustatyta temperatūra lygi 51,5 °C.

Toliau būtų galima tęsti tyrimą ieškant būdų, kaip naudojant įvairias betono priemaišas, ar jas maišant tarpusavyje, pasiekti kuo artimesnį rezultatą aušinimui pasitelkiant vamzdelių sistemą.

Šarkus Liutauras. Structural and Technological Solutions for Massive Concrete Structures. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Jolanta Šadauskienė; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: Hydration, Cement, Concrete, Cooling, Temperature.

Kaunas, 2022. 70.

Summary

Concrete is one of the most widely used building materials in the world due to its excellent load-bearing properties. However, cement, which is one of the main components of concrete, reacts with water to generate a huge amount of heat inside the structure during hydration. This rise in temperature is becoming a huge problem for massive concrete structures such as hydroelectric power stations, dams, foundations, wall structures because natural cooling is no longer enough to cool the foundation. As the temperature rises, stresses develop in the concrete, which can lead to thermal cracking of the structure, which would significantly affect the strength of the load-bearing properties.

Nowadays, in practice, there are many ways to control this radiant heat. There are two groups of solutions - mineral, replacing part of the cement with impurities and thus reducing its amount, and technological, externally controlling the heat released, preventing it from rising to a dangerous level. Limestone, fly ash, slag can be used as a substitute, and it is also effective to increase the size of the aggregates or cool them before use. The most effective technological solution would be to cool the structure along its entire volume by placing pipes that flow with water at a much lower temperature during hydration or using ice, also reducing the amount of water used in the mixture.

In the final master's thesis, the following methods of temperature reduction are compared by performing numerical simulations with the help of the temperature calculation program HACON 3. After obtaining the theoretical results, they are compared with the experimental ones received during monitoring of the bridge foundation and observing real temperature release and development at site.

The results show that the most effective solution for cooling of the foundation is technological method - the use of cooling pipes. Data obtained during simulation was proportional to the practical results obtained during monitoring of the bridge. Some small discrepancies were found - in practice it was found that temperature rose to 63,3 ° C during hydration, which is slightly more than theoretical results, where the maximum temperature was registered as 51,5 ° C.

It would be possible to continue the study by finding ways to achieve the closest possible cooling result (to the one using pipes) by using different concrete admixtures or mixing them together.

Turinys

Turinys.....	7
Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Literatūros duomenų analizė.....	13
1.1. Cemento hidratacijos sukeltos problemos masyviose betoninėse konstrukcijose.....	13
1.1.1. Masyvios betoninės konstrukcijos apibrėžimas	14
1.1.2. Cemento hidratacijos procesas	16
1.1.3. Parametrai, apibūdinantys šilumines betono savybes	18
1.2. Įtrūkių atsiradimo dėl cemento hidratacijos priežastys	19
1.2.1. Reikalavimai temperatūrai.....	20
1.3. Priemonės, mažinančios šilumos išsiskyrimą cemento hidratacijos metu	22
1.3.1. Cemento kiekio mažinimas	22
1.3.2. Technologiniai aušinimo metodai	24
1.4. Temperatūros pasiskirstymo modeliavimas	29
1.5. Literatūros analizės apibendrinimas	32
2. Automobilinio tilto monitoringas.....	33
2.1. Rostverko konstrukcijų apžiūra prieš betonavimo darbus.....	33
2.2. Rostverko betonavimo darbai	34
2.3. Temperatūrinių matavimų rezultatai	35
3. Masyvios konstrukcijos – pamato šiluminio modeliavimo metodika	36
3.1. Referencinis modelis	36
3.1.1. Prielaidos	36
3.1.2. Geometrija	36
3.1.3. Medžiagiškumas	37
3.1.4. Ribinės sąlygos.....	39
3.1.5. Plokštumos modeliavimas	42
3.2. Stambesni užpildai.....	43
3.3. Atšaldyti užpildai.....	44
3.4. Ledas.....	44
4. Rezultatai.....	45
4.1. Šiluminio modeliavimo rezultatų analizė	45
4.1.1. Neaušinamas pamato modelis	45
4.1.2. Pamato modelis, aušintas vamzdeliais	46
4.1.3. Skirtingų aušinimo variantų palyginimas.....	47
4.1.4. Teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas.....	49
5. Įtrūkimų rizikos modeliavimas	51
5.1.1. Referencinis (neaušinamas) modelis.....	51
5.1.2. Palyginimas su kitais rezultatais.....	52
Išvados	54
Literatūros sąrašas	55
Priedai.....	58

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Betono ir įvairių rūšių užpildų CTE vertės, kurios buvo nurodytos mokslinėje literatūroje	18
2 lentelė. Užsiduotos sąlygos	39
3 lentelė. Laikas ir temperatūra skirtingoms ribinėms sąlygoms	40
4 lentelė. Temperatūrinės raidos vertės	67
5 lentelė. Įtempių ir stiprio santykio vertės	68

Paveikslų sąrašas

1 pav. Itaipu hidroelektrinės bendri vaizdai	13
2 pav. Itaipu užtvankos vertikalūs įtrūkimai	13
3 pav. Hidroelektrinės išsiliejimas ir konstrukcijos įtrūkimas dėl šiluminio poveikio, cemento hidratacijos metu	14
4 pav. Betoninių konstrukcijų, kurioms gali būti naudingas šiluminis modeliavimas, pavyzdžiai: a) plokštės ant grunto; b) betoninės užtvankos; c) siloso / izoliacinės struktūros; d) aušinimo bokštai; e) vėjo jėgainių pamatai; f) poliai; g) surenkamieji segmentai; h) tetrapadų vienetai; i) tilto atramos; ir j) atraminės sienos.	16
5 pav. Cemento šilumos išsiskyrimo hidratacijos metu schema	17
6 pav. Masyvių betoninių konstrukcijų įtrūkimų proceso schema.....	19
7 pav. Skirtingų betono mišinių palyginimas.....	23
8 pav. Temperatūros pokyčių skalė, priklausomai nuo šlako kiekio.	24
9 pav. LN vėsinimo tipinis pritaikymas aikštelėje	25
10 pav. Automatinės vėsinimo sistemos schema	27
11 pav. masyvo išskirstymas šešiakampiais plotais.....	27
12 pav. Vėsinimo vamzdelių išdėstymo variantai.....	28
13 pav. Vamzdelių išdėstymas optimaliam darbui	29
14 pav. Temperatūros pasiskirstymas vėsinamame betono elemente.....	31
15 pav. Tipinis panardinto tunelio galerijos sienos modeliavimo pavyzdys	31
16 pav. Rostverko armatūros ir aušinimo vamzdelių išdėstymas prieš betonavimo darbus.....	33
17 pav. Rostverko betonavimo darbai.....	34
18 pav. Skerspjūvis ir plokštuma	36
19 pav. Pamato geometrija.....	37
20 pav. Pamatui priskirtos medžiagos.....	38
21 pav. Betonavimui nustatyti parametrai	39
22 pav. Pamato konstrukcijos temperatūrinės ribinės sąlygos.....	40
23 pav. Poslinkiai, ties gruntu suvaržyti x ir y kryptimis	40
24 pav. Vamzdelių išdėstymas pamato tūryje.....	41
25 pav. Bendri duomenys simuliacijai	42
26 pav. Duomenys pirmam intervalui.....	42
27 pav. Duomenys antram intervalui	42
28 pav. Plokštumos pjūvis su poslinkio ribinėmis sąlygomis.....	43
29 pav. Skaičiavimui užsiduodami duomenys plokštumos pjūvio simuliacijai.....	43
30 pav. Cemento kiekio priklausomybė nuo užpildo dydžio.....	44
31 pav. Didžiausių temperatūros reikšmių raida neaušinamo pamato atveju	45
32 pav. Maksimali temperatūra, gauta neaušinto modelio simuliacijoje	46
33 pav. Didžiausių temperatūros reikšmių raida aušinimo su vamzdeliais atveju.....	47
34 pav. Maksimali temperatūra, gauta simuliacijoje su aušinimo vamzdeliais	47
35 pav. Skirtingų modelių temperatūros raidų palyginimas	48
36 pav. Procentinis maksimalios temperatūros sumažinimas, lyginant su neaušinamu modeliu	49
37 pav. Eksperimentinės ir teorinės temperatūros raidos palyginimas	49
38 pav. Didžiausių pagrindinių įtempimų plokštumos pjūvyje raida.....	51
39 pav. Neaušinamo modelio didžiausias pagrindinis įtempis plokštumos pjūvyje.....	51
40 pav. Neaušinamo modelio įtempimų ir stiprio santykio pasiskirstymas plokštumos pjūvyje	52

41 pav. Įtempių ir stiprumo santykio raida neaušiamo modelio plokštumoje	52
42 pav. Įtempių ir stiprumo santykio raida skirtingais atvejais	53
43 pav. Įtempių / stiprumo santykio palyginimas, sumažinimo procento atžvilgiu, lyginant rezultatus su referentiniu modeliu	53
44 pav. Maksimali temperatūra, gauta neaušinto modelio simuliacijos metu	59
45 pav. Maksimali temperatūra, gauta modelio aušinto stambesniais užpildais simuliacijos metu .	59
46 pav. Maksimali temperatūra, gauta modelio aušinto atšaldytais užpildais simuliacijos metu.....	60
47 pav. Maksimali temperatūra, gauta modelio aušinto ledu simuliacijos metu	60
48 pav. Maksimali temperatūra, gauta modelio aušinto vamzdžiais simuliacijos metu	61
49 pav. Didžiausias pagrindinis įtempis neaušiamo modelio simuliacijos metu	61
50 pav. Didžiausias pagrindinis įtempis stambesniais užpildais aušinto modelio simuliacijos metu	62
51 pav. Didžiausias pagrindinis įtempis atšaldytais užpildais aušinto modelio simuliacijos metu ..	62
52 pav. Didžiausias pagrindinis įtempis ledu aušinto modelio simuliacijos metu.....	63
53 pav. Didžiausias pagrindinis įtempis vamzdeliais aušinto modelio simuliacijos metu	63
54 pav. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas neaušinto modelio simuliacijos metu	64
55 pav. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas stambesniais užpildais aušinto modelio simuliacijos metu	64
56 pav. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas atšaldytais užpildais aušinto modelio simuliacijos metu	65
57 pav. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas ledu aušinto modelio simuliacijos metu	65
58 pav. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas vamzdeliais aušinto modelio simuliacijos metu	66
59 pav. „Smart Built Environment“ konferencijos dalyvio sertifikatas.....	70

Įvadas

Temos aktualumas

Šiuolaikiniai statiniai turi atitikti esminius statinio reikalavimus, kurie apibrėžia ir užtikrina projektuojamų, statomų ir jau pastatytų statinių kokybę. Europos Parlamento ir Tarybos reglamentas (ES) Nr. 305/2011 išskiria 7 esminius statinio reikalavimus: statiniai ir atskiros jų dalys, atsižvelgiant į susijusių asmenų sveikatą ir saugą viso statinių gyvavimo ciklo metu, turi atitikti šių statinių naudojimo paskirtį ir atitinkamai tenkinti mechaninio atsparumo ir pastovumo, gaisrinės saugos, higienos, sveikatos ir apsaugos, saugos ir galimybės patekti į statinius eksploatacijos metu (įskaitant ir žmonių su negalia poreikius), apsaugos nuo triukšmo, energijos taupymo ir šilumos išsaugojimo, tvaraus išteklių naudojimo reikalavimus. Svarbūs inžineriniai infrastruktūros statiniai, tokie kaip tiltai ir viadukai, projektuojami mažiausiai 100 metų eksploatacijos laikotarpiui, todėl statinio mechaninio atsparumo ir pastovumo, o kitaip tariant ilgaamžiškumo, užtikrinimo klausimas ypač aktualus.

Per pastaruosius 40 metų visame pasaulyje išpopuliarėjo betonas ir gelžbetonis, nes betono gamyboje dažniausiai naudojamos vietinės žaliavos, todėl betoninių konstrukcijų kaina yra gerokai mažesnė.

Rūpestingai prižiūrimi gelžbetoniniai statiniai išsiskiria ilgaamžiškumu ir neribota architektūrinės formos įvairove, o modifikuotasis betonas leidžia kontroliuoti įvairias technologines savybes (mišinio slankumą, nusėdimo mažinimą), tai atveria daugiau galimybių statybos procesams.

Betonas dažniausiai naudojamas statant ypatingo stiprumo ir patvarumo reikalaujančius objektus, tokius kaip atominės elektrinės ir hidroelektrinės, užtvankas, didelių gabaritų pamatus, tilto atramas, masyvias sienas, dangoraižius, bangolaužius ir t. t. Šioms masyvioms gelžbetoninėms konstrukcijoms reikia milžiniškų betono kiekių, kuris prisideda prie reikšmingo šilumos kiekio išskyrimo cemento hidratacijos metu. Dėl šios priežasties, temperatūra konstrukcijos viduje gali pakilti nuo 50 iki 90 °C suteikdama šilumos iki 500 J vienam gramui cemento, o pats betonas, kaip žinia, yra prastas šilumos laidininkas [4].

Hidratacijos karštis ir išoriniai šilumos nuostoliai gali sukelti didelį temperatūros skirtumą tarp masyvios konstrukcijos šerdies ir paviršiaus. Netolygus šiluminis plėtimasis gali sukelti didelius tempimo įtempius masyvios gelžbetonio konstrukcijos paviršiuose, prieš pasiekiant visą tempimo jėgą. Šiluminis įtrūkimas greičiausiai įvyks, kai šiluminis įtempis viršys tempimo jėgą. Tokiu būdu konstrukcijoje gali atsirasti neleistino pločio įtrūkimai, kurie gali turėti įtakos konstrukcijos saugai ir ilgaamžiškumui. Nesiimant apsaugos ar stiprinimo veiksmų, statinys greitai praranda eksploatacines savybes. Todėl visai nenuostabu, kad pasaulyje didžiulės finansinės investicijos, mokslininkų ir inžinierių pastangos skiriamos konstrukciniams ir technologiniams sprendimams tobulinti bei naujoms, efektyvioms medžiagoms kurti, siekiant išvengti įtrūkių atsiradimo dėl cemento hidratacijos proceso masyviose betoninėse konstrukcijose.

Darbo tikslas - išanalizuoti masyvaus betono konstrukcijų temperatūrinius aspektus ir pritaikyti technologines priemones, kurios kontroliuos ir mažins išsiskiriantį šilumos kiekį cemento hidratacijos metu.

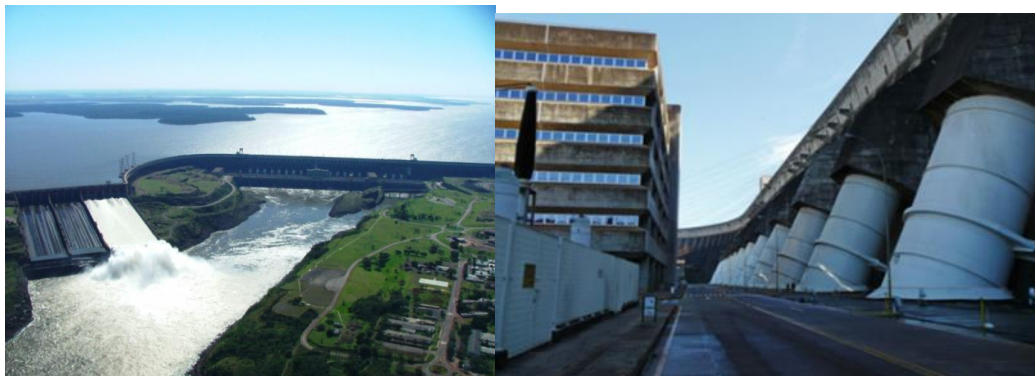
Uždaviniai

1. Atlikti literatūros analizę, siekiant nustatyti tikslų apibūdinimą ir patikimą metodiką apibrėžiančią masyvios betoninės konstrukcijos sąvoką.
2. Nustatyti technologines priemones, kurios mažintų šilumos išsiskyrimą ir kontroliuotų temperatūros kilimą dėl cemento hidratacijos.
3. Atlikti automobilinio tilto monitoringą, stebint temperatūros gradientus dėl hidratacijos proceso.
4. Šiluminio modeliavimo būdu išanalizuoti skirtingus masyvios konstrukcijos aušinimo metodus.
5. Modeliavimo būdu nustatyti įtrūkimų rizikos galimybę.
6. Palyginti eksperimento rezultatus su modeliavimo rezultatais.

1. Literatūros duomenų analizė

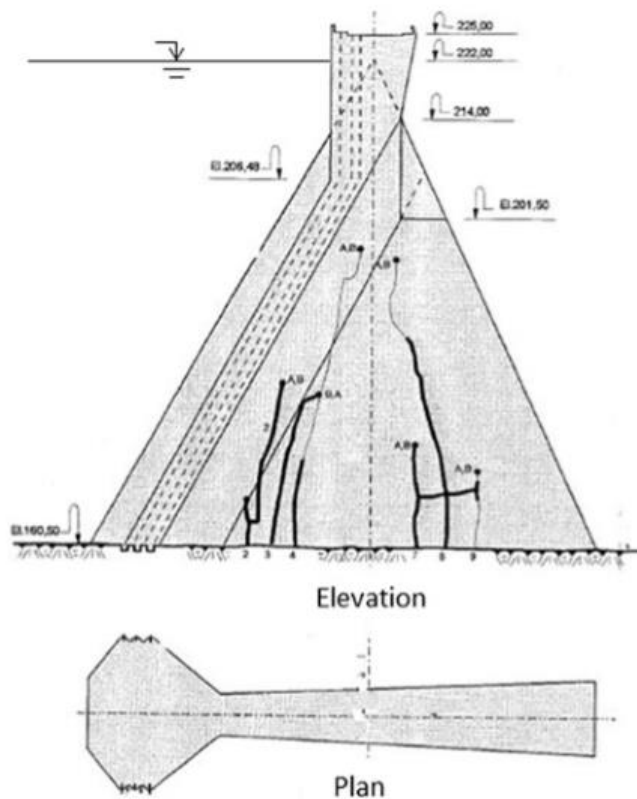
1.1. Cemento hidratacijos sukeltos problemos masyviose betoninėse konstrukcijose

Literatūros šaltinių analizė rodo, kad yra realių pavyzdžių apie cemento hidratacijos sukeltas problemas masyviose betoninėse konstrukcijose. Vieną labai reikšmingą atvejį, susijusį su Itaipú hidroelektrine, aprašė Betioli [1]. Itaipú (pastatyta 1975 m.), iki šios dienos yra antra pagal dydį elektrinė pasaulyje (14 000 MW, per metus pagamina 2.3 109 MWh elektros).



1 pav. Itaipu hidroelektrinės bendri vaizdai

Statant elektrinės užtvanką, buvo pastebėti dėl šiluminio efekto atsiradę įtrūkimai. Dauguma jų buvo vertikalūs, didžiojoje bloko dalyje, keletas buvo aptikta atramos gale.



2 pav. Itaipú užtvankos vertikalūs įtrūkimai

Vykdam tuometines analizes buvo nustatyta, kad tokius įtrūkimus sukėlė šiluma, susidariusi cemento hidratacijos metu, kuri buvo žymiai didesnė, nei buvo numatyta projektuojant užtvanką [2]. Taip pat nustatyta, kad modeliai, naudojami imituoti masyvios betono konstrukcijos ankstyvosios stadijos elgseną, buvo labai supaprastinti ir juos sudarant nebuvo atsižvelgta į geometrijos sukeltas įtempių koncentracijas.

Kitas masyvios betono konstrukcijos įtrūkimo pavyzdys buvo paminėtas Funahashi ir Kuperman'o [3] mažos hidroelektrinės ištakose (žr. 3 pav.). Šiuo atveju nustatyta, kad įtrūkimus, atsiradusius išpylimo tako bloke, sukėlė cemento hidratacijos sukeltas poveikis.



3 pav. Hidroelektrinės išsiliejimas ir konstrukcijos įtrūkimas dėl šiluminio poveikio, cemento hidratacijos metu

Mokslininkai ir inžinieriai teigia, kad tokių problemų galima išvengti, tačiau projektavimo stadijoje reikia tiksliai išanalizuoti statybos etapą ir eksploatacinį laikotarpį. Jei projekto metu nustatoma įtrūkimų susidarymo galimybė, būtina imtis veiksmų, siekiant sumažinti ankstyvosios stadijos įtempius.

Tam reikia išanalizuoti įtrūkių dėl cemento hidratacijos atsiradimo masyviose betoninėse konstrukcijose priežastis.

1.1.1. Masyvios betoninės konstrukcijos apibrėžimas

Skirtingi literatūros šaltiniai skirtingai traktuoja masyvaus betono konstrukcijos apibrėžimą. Amerikos betono instituto komitetas masyvų betoną apibūdina kaip betono tūrį, kurio matmenys yra tokie dideli, kad yra reikalaujama imtis priemonių, kurios kontroliuotų cemento hidratacijos metu susidariusią šilumą ir jos lydimu konstrukcijos tūrio pokyčiu, kuris gali sukelti nepageidaujamus šiluminius įtempius, įtrūkimus, kenksmingas chemines reakcijas ar ilgalaikio stiprumo sumažėjimą [4].

Ulm'as ir Coussy [5] sukūrė masyvaus betono apibrėžimą, kuris apibūdina betono savybių derinį, įskaitant šilumos išsiskyrimą, šilumos transportavimą, betono tūrio pokyčius (šiluminės deformacijos įtempis, susitraukimo įtempis ir slinkimo deformacijos) bei fizikinių savybių vystymąsi. Tai nurodo,

kad santykinai ploni elementai, pagaminti iš efektyvaus betono, pasižymintys greitai besivystančiu standumu ir dideliu šilumos išsiskyrimu, gali būti laikomi masyvaus betono pavidalu, kaip ir daug storesni normalaus stiprumo betono gaminiai.

M. Batog'as [6] teigia, kad mažiausias masyvaus betono gaminio matmuo yra bent 80 cm, o Kim'as [7] pateikia skirtingus masyvių betoninių konstrukcijų matmenų apribojimus Korėjai ir Japonijai. Plokštėms ir sienoms 0,8–1 m Korėjoje ir 0,5 m Japonijoje; visoms kitoms konstrukcijoms didesni nei 1 m Korėjoje ir 0,8 m Japonijoje.

Kiti mokslininkai bandė sukurti metodiką, leidžiančią apskaičiuoti masyvios betoninės konstrukcijos struktūrą pagal būdingąjį ilgį l_h . Pateikta tokia formulė [5]:

$$l_h = \sqrt{D\tau_h}; \quad [1.1.1.1]$$

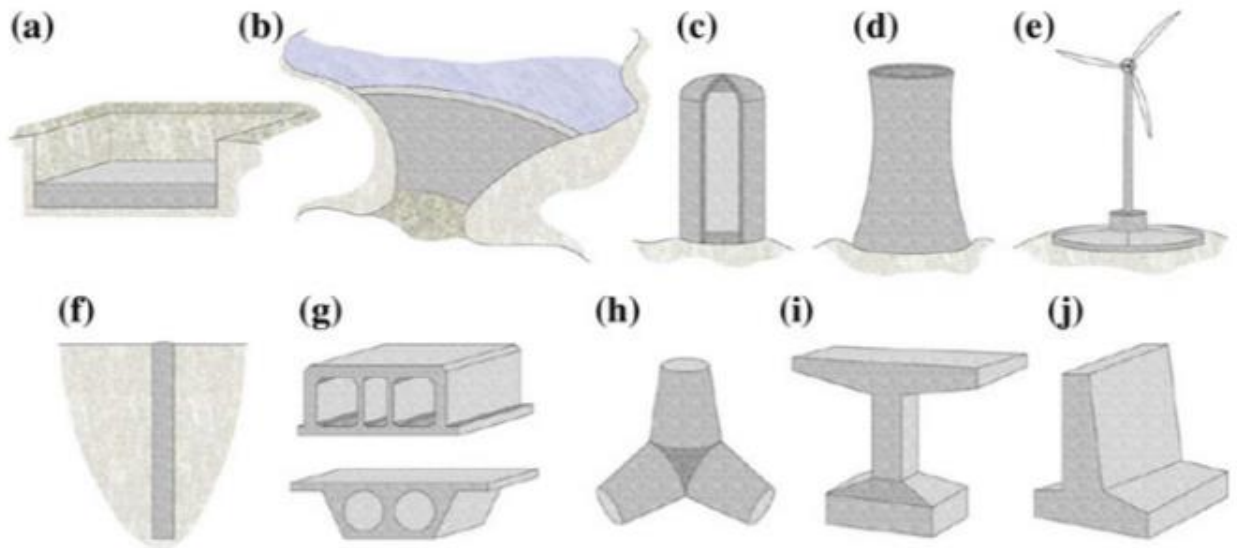
čia: D – betono šilumos laidumas;
 τ_h - hidratacijos laikas.

Pagal šią formulę visos konstrukcijos hidratacijos ilgis turėtų būti atitinkamai 0,4 m normalaus stiprumo betono ir 0,6 m didelio stiprumo betono. Išsprendus lygtį, jei rezultatai rodo, kad ilgis yra trumpesnis nei būdingasis ilgis l_h , laikoma, kad sąlygos izoterminės ir šiluma iš konstrukcijos pašalinama difuzijos būdu, t. y. cemento hidratacija neigiamo poveikio nesudaro. Tačiau, jei matmenys yra didesni, difuzijos proceso nepakanka, kad konstrukcija neišskirtų per daug šilumos. Šiose vietose vietoj izoterminių sąlygų yra taikomos adiabatines. Tokiu atveju cemento hidratacija gali sukelti neigiamų padarinių, pavyzdžiui konstrukcijos įtrūkimus.

Deja, skaičiavimai pagal 1 formulę yra netikslūs, nes kuriant šią metodiką buvo daroma daug prielaidų. Viena iš jų yra ta, kad šilumos laidumo lygtis buvo išspręsta atsižvelgiant į vienadimensę erdvę ir dėl simetrijos priežasčių ištirta tik teigiama erdvės pusė ($x > 0$). Taip pat autoriai čia vertina adiabatines sąlygas, o tai reiškia, kad energija nei kaupiama, nei prarandama. Tai atspindi „begalinių masyvių konstrukcijų“ elgseną, nes šiluma sunkiai pašalinama iš konstrukcijos šerdies ir šilumos nuostolių beveik nėra. Tačiau realybėje veikia izoterminės sąlygos.

Norėdamas gauti apytikslesnį tiek normalaus stiprumo betono, tiek didelio efektyvumo betono ribinę vertę, Ulm'as [5] hidratacijos laiką τ_h nustatė kaip pastovų, kuris trunka nuo 8 iki 16 valandų. Anot Ulm'o [5], šis diapazonas atitinka laikotarpį, kai adiabatiniomis sąlygomis hidratacija pasiekia maksimumą.

Atlikus literatūros analizę, nustatyta, kad nėra tikslaus apibūdinimo ir nėra patikimos metodikos, apibrėžiančios masyvios betoninės konstrukcijos sąvoką, tačiau mokslininkai ir inžinieriai pripažįsta, kad projektuojant atominės elektrines ir hidroelektrines, užtvankas, didelių gabaritų pamatus, tilto atramas, masyvias sienas, dangoraižius, bangolaužius ir t. t reikia atlikti išankstinę temperatūros modeliavimą ir numatyti prevencines priemones staigiam temperatūros kilimui konstrukcijos viduje cemento hidratacijos metu.

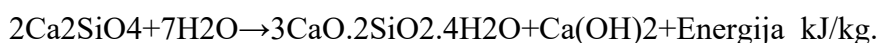
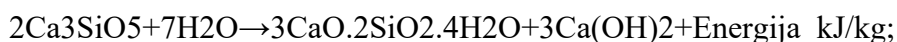


4 pav. Betoninių konstrukcijų, kurioms gali būti naudingas šiluminis modeliavimas, pavyzdžiai: a) plokštės ant grunto; b) betoninės užtvankos; c) siloso / izoliacinės struktūros; d) aušinimo bokštai; e) vėjo jėgainių pamatai; f) poliai; g) surenkamieji segmentai; h) tetrapadų vienetai; i) tilto atramos; j) atraminės sienos.

1.1.2. Cemento hidratacijos procesas

Betonas yra užpildų, rišiklio ir vandens junginys. Tai viena iš labiausiai naudojamų statybinių medžiagų pasaulyje. Kaip medžiaga, ji yra patvari, darbinga ir atspari tokiems reiškiniams, kaip korozija, šaltis ir ugnis. Betonas naudojamas statant ypatingo stiprumo ir patvarumo reikalaujančius objektus, tokius kaip atominės elektrinės ir hidroelektrinės, užtvankas, didelių gabaritų pamatus, tilto atramas, masyvias sienas ir t. t. Šioms konstrukcijoms reikia milžiniškų betono kiekių, kurie prisideda prie reikšmingo šilumos susidarymo cemento hidratacijos metu, dėl kurio konstrukcijoje pakyla temperatūra.

Cementas yra pagamintas produktas, kuris prisideda prie šiluminio efekto konstrukcijos viduje. Jame yra kalkių, gipso, silicio dioksido ir aliuminio oksido, tačiau pagrindiniu cheminiu cemento komponentu išlieka kalcio silikatas. Kalcio silikatas yra unikalus jėgos šaltinis hidratacijos metu. Portlandcemente yra maždaug 39-50 % trikalčio silikato (Ca_3SiO_5), 20-45 % dikalcio silikato (Ca_2SiO_4), 8-12 % trikalčio aluminato ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), 6-10% tetrakalcio aliumoferito ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Šie kiekiai priklauso nuo cemento naudojamo tipo. Trikalčio ir dikalcio silikatai, reaguodami su vandeniu, sukuria gelį, kuris vadinamas kalcio hidrosilikatu ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Reakcijos lygtys [8]:



Šių reakcijų metu išsiskiria energija dėl cheminių jungčių ardymo ir naujų jungčių susidarymo, suteikdama šilumos iki 500 J/g vienam gramui cemento. Šios energijos perteklius gali pakelti temperatūrą konstrukcijos viduje nuo 50 iki 90 °C [4,9].

Cemento hidratacijos procesas yra egzoterminio pobūdžio, todėl šį procesą nusako hidratacijos trukmės ir jos metu išsiskiriančios šilumos tarpusavio ryšys (žr. 5 pav.) [7]. Atsižvelgiant į

hidratacijos metu besikeičiančios cemento tešlos mikrostruktūros pokyčius, hidratacijos procesas yra skirstomas į ankstyvąją (0 ÷ 24 val.) ir vėlyvąją hidrataciją (24 ÷ 28 parų) [5].

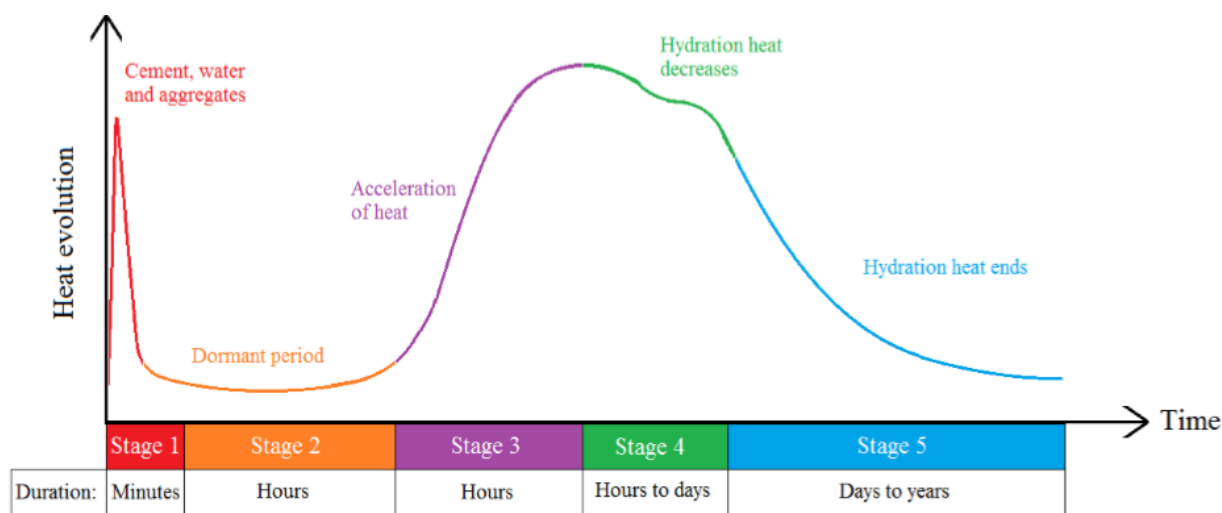
Kai į betono mišinį įpilama vandens, prasideda pirmasis etapas ir trunka apie 15–30 minučių. Tačiau ši trukmė gali skirtis priklausomai nuo cemento rūšies ir priedų, kurie naudojami betono mišinyje. Šie komponentai taip pat gali paveikti reakcijos greitį dėl savo granulimetrinės sudėties. Šiame etape trikalčio silikato jonai ištirpinami ir reaguodami kartu su gipsu ir vandeniu, sudaro etringitą. Etringitas veikia kaip kliūtis ir trukdo tolimesnėms trikalčio silikato reakcijoms, todėl reakcija būna lėtesnė [10].

Esant žemesniam hidratacijos lygiui, prasideda antrasis etapas. 5 pav. parodytas beveik pastovus hidratacijos greitis antrojo etapo pradžioje. Vėliau jonų koncentracija palaipsniui didėja, tačiau vis tiek išlieka maža. Todėl šis etapas vadinamas neaktyviu periodu ir trunka apie 5 valandas [10].

Trečiojo etapo metu hidratacijos šiluma pamažu didėja ir pasiekia didžiausią vertę. Kalcio hidrosilikatu kristalizavimas prasideda dėl padidėjusio etringito suformuoto sluoksnio pralaidumo [10].

Pasiekus maksimalios hidratacijos šilumos viršūnę, prasideda ketvirtasis etapas. Hidratacijos šiluma pamažu mažėja, nes jau susiformavę hidratai tampa apsauginiu sluoksniu dar nereagavusiai daliai. Tai lemia jonų tirpimo sumažėjimą [10].

Cemento hidratacija baigiasi, kai pasiekiamas penktoji stadija. Šiame etape hidratacijos šiluma yra beveik tokia pati, kaip ir ramybės periodo metu. Pradinis vanduo, esantis mišinyje, jonų reakcijos metu beveik pakeičiamas hidratais [10].



5 pav. Cemento šilumos išsiskyrimo hidratacijos metu schema.

1-4 stadijos yra laikomos ankstyvąja stadija, kuri yra pavojingiausia masyvios betoninės konstrukcijos gamyboje. Būtent šioje stadijoje gali atsirasti įtrūkimai, nulemiantys konstrukcijos ilgaamžiškumą ir patikimumą. Ankstyvosios stadijos įtrūkimai yra apibrėžiami kaip įtrūkimai, kurie paprastai išryškėja per pirmąsias septynias dienas po betono liejimo; tačiau 60 dienų gali būti laikoma didžiausia ankstyvosios stadijos įtrūkio riba.

1.1.3. Parametrai, apibūdinantys šilumines betono savybes

Svarbiausi veiksniai, turintys įtakos betono šilumos laidumui, yra užpildo tūrio dalis, oro kiekis ir betono drėgmės būklė, pvz. kaip minėjo Kim'as [7]. Be to, taip pat buvo nustatyta, kad atitinkama hidratacijos stadija (betono stingimo laikas) nesudaro reikšmingo poveikio betono šilumos laidumui, išskyrus labai ankstyvą stadiją - t. y. pirmąsias 2 dienas [7, 12]. Pasak Bentz'o [12], taip yra todėl, kad betono mišinio komponentų (vandens šilumos laidumo koeficientas: 0,604 W / (mK) ir cemento šilumos laidumo koeficientas: 1,55 W / (mK)) ir hidratuotos betono mišinio šilumos laidumas yra pakankamai artimi, todėl kietųjų medžiagų perteklius arba akytumas gali turėti tik ribotą poveikį šiai savybei (apie $\pm 10\%$). Tyrimais buvo nustatyta, kad pagrindinių hidratacijos produktų, t. y. C – S – H ir CH, šilumos laidumo koeficientas yra atitinkamai 0,978 W / (mK) ir 1,32 W (mK) [13]. Todėl betono mišinio šilumos laidumas yra apie 1,0 W / (mK). Šiuo požiūriu priemaišos gali turėti tik nereikšmingą poveikį šilumos laidumui.

Kitas svarbus šiluminis parametras yra savitasis šilumos tūris C_p . Tai yra energijos kiekis [J], reikalingas tam tikros medžiagos 1 masės vienetui [g] padidinti temperatūrą vienetu [K]. Šiluminė talpa priklauso nuo vandens kiekio pokyčių ir mikrostruktūros evoliucijos hidratacijos metu.

Specifinė cemento šiluminė talpa lygi 0,75 J / (gK) [12], o vandens savitoji šiluminė talpa lygi 4,18 J / (gK). Nepaisant to, kai vanduo patenka į hidratacijos produktus, jo faktinė šiluminė talpa sumažėja iki 2,20 J / (gK) [14]. Molekulinis modeliavimas patvirtina, kad uždaro vandens šiluminė talpa C – S – H lyginant su laisvu vandeniu yra mažesnė [13].

Siekiant kiekybiškai įvertinti betono pažeidžiamumą dėl sulaukytų šiluminių deformacijų, tuo pačiu ir įtrūkimų rizikos, naudojamas temperatūrinis plėtimosi koeficientas (CTE), išreiškiantis betono polinkį deformuotis dėl temperatūros pokyčių. CTE, jei nenurodyta kitaip, nurodo linijinį koeficientą, išreiškiantį ilgio pokytį (susitraukimą ar išsiplėtimą) esant temperatūros pokyčiams (atitinkamai vėsinant ar kaitinant). 1 lentelėje pateikiama betono ir įvairių rūšių užpildų CTE vertės, kurios buvo nurodytos mokslinėje literatūroje.

1 lentelė. Betono ir įvairių rūšių užpildų CTE vertės, kurios buvo nurodytos mokslinėje literatūroje

Medžiaga / būklė	CTE [$\mu\text{m} / \text{m} / ^\circ\text{C}$]	Literatūra
Betonas, kurio masė 0,40, 72 tūrio proc. užpildai, 5 % silicio dioksido dūmai	7–11 (100–88 % prisotinimo laipsnis)	Sellevoid'as ir Bjøntegaard'as [16]
Betonas, kurio tūris 0,45 * 74 tūrio proc. užpildai, kalkakmenio šiurkštus užpildas	5 - 7	Yeon'as et al. [17]
Betonas, kurio tūris 0,45 * 71 tūrio proc. užpildai, žvyro šiurkštus užpildas	8–9	Yeon'as et al. [17]
Betonai, kurių masė 0,30 – 0,45, * 66 tūrio proc. užpildai, metamorfinis kalkakmenio grubus užpildas	6.5–7.6	Kada et al. [18]
Betonai: normalūs (v / c 0,45) ir stiprūs (v / c 0,25 ir v / c 0,31), apie 70 tūrio proc. Užpildai (kalkakmenis)	10–11	Cook'as et al. [19]
Betonas (rekomenduojamas)	11	ACI [4]
Betonas, apie 70 tūrio proc. užpildai, žvyras šiurkštus užpildas v / c 0,40	9.3	Naik'as et al. [20]
Betonas (tipinė vertė)	10–12	Bentz'as [12]

1.2. Įtrūkių atsiradimo dėl cemento hidratacijos priežastys

Betono masės temperatūra gali žymiai ir staigiai padidėti (nuo 50 iki 90 °C) dėl šilumos išsiskyrimo, kurį sukelia cemento hidratacija, ir šiluminių ribų, kurios labai masyviems elementams gali net priartėti prie adiabatinių sąlygų. Ši šiluma išsilaiko konstrukcijos šerdyje dėl santykinai mažo betono šilumos laidumo ir konstrukcijos aušinimo procesas gali trukti net dešimtmečius [21]. Dėl šios temperatūros padidėjimo iš betono pagamintų konstrukcinių elementų šiluminė deformacija daro įtaką cemento hidratacijos kinetikai ir hidratacijos produktų fazinei sudėčiai. Kai betono temperatūra padidėja, o vėliau vėl sumažėja, atsiranda šiluminis įtempimas (išsiplėtimas kaitinant ir susitraukimas aušinant). Dėl temperatūros gradientų betono elemento skerspjūvyje elemento šerdis (patirdama aukštesnę temperatūrą) iš pradžių išsiplečia daugiau nei išorinis paviršius (esant žemesnei temperatūrai). Dėl to paviršiuje atsiranda tempimo įtempiai, kurie gali sukelti paviršiaus įtrūkimus. Šie įtrūkimai atsiranda fazėje, kai temperatūra vis dar didėja. Paprastai jie yra palyginti ploni ir užsitraukia vėliau, kai susibalansuoja viso betono gaminio temperatūra.

Esant išoriniam suvaržymui (pvz., bet kuriai gretimai konstrukcijai ar pagrindo sluoksniui) bei padidėjus temperatūrai, betoninės masės šerdyje atsiranda gniuždymo įtempiai. Šie gniuždomieji įtempiai ilgainiui virsta tempimo įtempiais, kai temperatūra sumažėja, kad susibalansuotų su išorine aplinka. Tai daugiausia lemia Jungo betono modulio skirtumas temperatūros padidėjimo ir temperatūros mažėjimo metu. Pradiniai gniuždymo įtempiai yra gana maži dėl mažo Jungo modulio ir didelio betono įtempio atpalaidavimo šilumos išsiskyrimo fazėje. Kai temperatūra mažėja, betono hidratacijos laipsnis didėja kartu su Jungo modulių, o atsipalaidavimas / valkšnumas mažėja kartu su hidratacijos laipsniu.

Kita priežastis, kodėl tempimo įtempiai viršija pradinį gniuždymo įtempį, yra kitų rūšių susitraukimai. Pavyzdžiui, autogeninis susitraukimas – jei betono temperatūra aušinimo fazėje yra aukštesnė už aplinkos temperatūrą, temperatūros skirtumas išsiplėtimo metu bus mažesnis nei aušinimo metu. Todėl šiluminio plėtimosi koeficientas (žr. 6 pav.) gali būti mažiausias, o vėliau padidėti savaiminio stingimo metu.

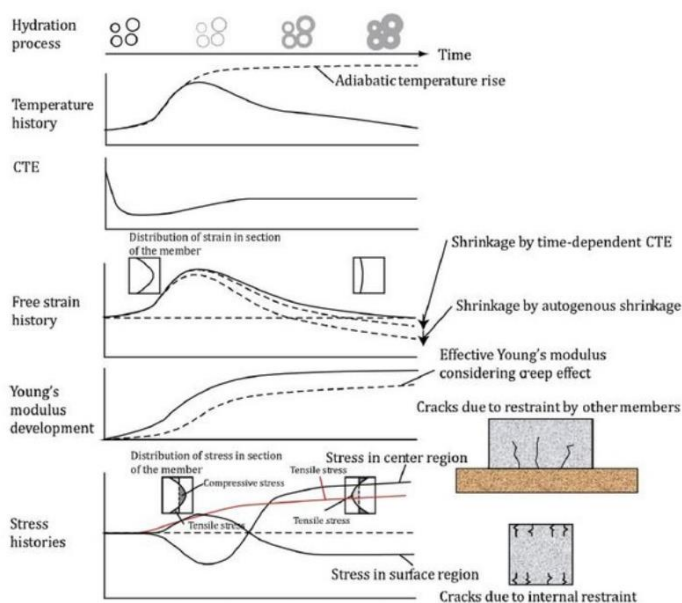


Figure 1 Schematic figure for cracking of mass concrete

6 pav. Masyvių betoninių konstrukcijų įtrūkimų proceso schema

Norint numatyti bet kokios hidratacijos stadijos šiluminio įtrūkimo riziką, būtina apskaičiuoti savaiminius įtempius (įtempius, kuriuos sukelia betono savaiminis arba išorinis suvaržymas, betono deformacijos) ir palyginti su tos pačios cemento hidratacijos stadijos betono tempiamuoju stipriu. 1D konfigūracijai (kuri visada yra ideali ir praktiškai ją reikia pritaikyti prie faktinės geometrijos), įtempį galima apskaičiuoti taip [22]:

$$\sigma = E_c(t)(\varepsilon - \varepsilon_{sh} - \varepsilon_{cr} - \varepsilon_{th}) \quad [1.2.1]$$

čia: $E_c(t)$ yra Jungo modulis tam tikru laiko momentu t ;
taškas rodo išvestinę laiko atžvilgiu;
 ε yra visa deformacija.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{sh} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_c \quad [1.2.2]$$

čia: e žymi elastingumą;
 sh - susitraukimas;
 th - šiluminis režimas;
 c - režis.

Šiluminis įtempimas ir susitraukimas yra varomoji įtrūkimo jėga, o valkšnumo įtempiai mažina savaime sukeltų įtempių dydį ankstyvojoje stadijoje.

Žinoma, tai galioja tik idealiu 1D atveju. Esant realiai sudėtingai geometrijai, deformacijas ir įtempius reikia apskaičiuoti 2D ar 3D formatu, naudojant baigtinių elementų metodą.

Siekiant išvengti įtrūkimų masyviose betono konstrukcijose reikia atlikti modeliavimą projektinėje stadijoje.

1.2.1. Reikalavimai temperatūrai

Europoje pagal įprastos betono paskirties specifikaciją nustatoma tik minimali betono temperatūra (5°C) pristatant produkciją. Pagal minėtą EU standartą, jei reikiama kitokia minimali temperatūra ar reikia nustatyti maksimalią temperatūrą - tokios ribos (kartu su leistiniais nuokrypiais), betono sudedamosios dalys ir aušinimo reikalavimai turėtų būti nurodyti gamintojo deklaracijoje arba susitarta dėl betono mišinio tarp gamintojo ir vartotojo.

ACI 301-16 specifikacijoje (ACI 2016) nurodoma, kad konstrukcinio betono minimali temperatūra nustatoma iškart po išpylimo, kuri svyruoja tarp 4,4 °C ir 12,8 °C, atsižvelgiant į aplinkos sąlygas, su kuriomis tenka susidurti vietoje ir į konstrukcinio elemento dydį (mažiausią matmenį) kartu su leistina paklaida. Maksimali tiekiamo betono temperatūra minėtame šaltinyje nurodoma kaip 35 °C.

Japonijos statybos inžinierių draugijos rekomendacijose dėl betono [24] nurodoma, kad minimali padengimo temperatūra yra 10 °C (kuri gali būti dar sumažinta iki 5 °C „Cinmass“ betono), o maksimali temperatūra – 35 °C.

Rekomendacijų, susijusių su betono temperatūra masyvaus betono konstrukcijoje, taikymo srityje galima nurodyti šiuos dokumentus ir gaires kaip pavyzdžius, kurie vis dėlto apima daugybę sričių visame pasaulyje:

- ACI 207.2R-07 (ACI 2007) pateikiamos rekomendacijos dėl maksimalios temperatūros ribų pagal kelis veiksnius, pavyzdžiui, betono savybes ir deformacijos sulaikymo tipą.
- ACI 301-16 (ACI 2016) nustato maksimalias betono temperatūros po liejimo ribas ir temperatūros skirtumus tarp liejimo centro ir paviršiaus. Tiksliau, maksimali temperatūra neturi viršyti 57 °C, o temperatūros skirtumas neturi viršyti 19 °C.
- Floridos transporto departamento specifikacijose [25] nustatyta didžiausia leistina betono temperatūra 82 °C, tuo pačiu užtikrinant, kad temperatūros skirtumas tarp betono šerdies ir išorinio paviršiaus neviršytų 20 °C.
- JSCE užtvankų betono gairėse [24] rekomenduojama minimali ir maksimali 5 °C ir 25 °C temperatūra.
- Japonijos betono instituto gairės [26] yra pagrįstos įtempių skaičiavimais, siekiant įvertinti įtrūkimų riziką, o ne pateikiamos konkrečios rekomendacijos dėl temperatūros išdėstymo / kitimo ribų. Šis šaltinis rekomenduoja atsižvelgti į klojinių pašalinimo pagal temperatūrą kriterijų, t. y. rekomenduojama klojinius nuimti tik tada, kai temperatūros skirtumas tarp betono vidaus ir aplinkos oro yra mažesnis nei maždaug 15–20 °C.
- CIRIA C660 Bamforth [27] pripažįsta „nykščio taisyklę“, pagal kurią betono temperatūros kilimas ribojamas iki 20 °C. Čia pateikiama integruota plyšių skaičiavimo metodika, daugiausia pagrįsta mišinio parametrais, hidratacijos šiluma ir poveikio bei sulaikymo sąlygomis.
- Kataro konstrukcijos specifikacijose [28] ribojama liejamo betono temperatūra iki maksimalios 21 °C temperatūros, kad būtų sumažintas šiluminis įtrūkimas, tačiau leidžiama temperatūra iki 27 °C, jei bus pademonstruotas patenkinamas betono veikimas, įskaitant modeliavimą ir šiluminius skaičiavimus. Be to, maksimali skirtinga temperatūra tarp masyvaus betono elemento vidaus ir išorės nurodoma kaip 20 °C. Taip pat betono paviršiaus temperatūros kritimas pasibaigus nurodytam kietėjimo laikotarpiui negali viršyti 11 °C per 24 valandas.

Švedijos betono standartas (SS-EN 206: 2013 + A1: 2016) aprašo betono užpildų reikalavimus, charakteristikas, gamybą ir atitiktį. Duomenys apie šias medžiagas yra tokie:

1. Lokieji pelenai:
 - K vertė yra lygi 0,4 CEM I portlandcemenčiui;
 - Lakiisiais pelenais galima pakeisti tik 33 % cemento;
 - Lakiųjų pelenų ir cemento kiekio santykis turi būti $\leq 0,33$ pagal masės dydį.
2. Silicio dioksido dūmai:
 - Vandens cemento santykis $> 0,45$;
 - K vertė yra lygi 1.
3. Šlakas:
 - K vertė lygi 0,6;
 - Šlako ir cemento kiekio santykis turi būti ≤ 1 pagal masės dalį.

K vertė yra pagrįsta betono ilgaamžiškumu. Jis gaunamas lyginant etaloninio betono su cementu „A“ bandymo rezultatus su bandomojo betono bandymo rezultatais, kur cemento „A“ dalis pakeičiama priemaiša, atsižvelgiant į vandens / cemento santykį ir įpylimo kiekį.

Atlikus literatūros analizę matyti, kad nėra bendrų standartų, rekomendacijų ir gairių, nurodančių masyvaus betono konstrukcijų projektavimo ir statybos scenarijų, siekiant išvengti įtrūkimų atsiradimą cemento hidratacijos etape. Kaip buvo minėta poskyrio pradžioje, sprendimus dėl scenarijaus turėtų susitarti rangovas ir savininkas. Iš tiesų dažnai pastebima, kad atskiri masyvaus betono konstrukcijų projektavimo ir statybos atvejai reikalauja skirtingų sprendimų. Šie reikalavimai įvairiose šalyse ir įmonėse paprastai skiriasi pagal vertę ir apribojimų tipą, pagal vietos klimatą, geografinius išteklius ir t. t.

1.3. Priemonės, mažinančios šilumos išsiskyrimą cemento hidratacijos metu

Masyvios betono konstrukcijos temperatūrai sumažinti cemento hidratacijos metu gali būti taikomi keli būdai. Cementas yra pagrindinis šilumą gaminantis komponentas, todėl pirmiausia galima sumažinti jo kiekį pakeičiant jį rišikliais, kurie savo reakcijos metu neišskiria šilumos.

Dažniausios pakaitinės medžiagos yra kalkakmenis, silicio dioksido dūmai, lakieji pelenai ir šlakai. Šie užpildai taip pat gali būti atšaldyti, kad būtų sumažinta pradinė betono temperatūra.

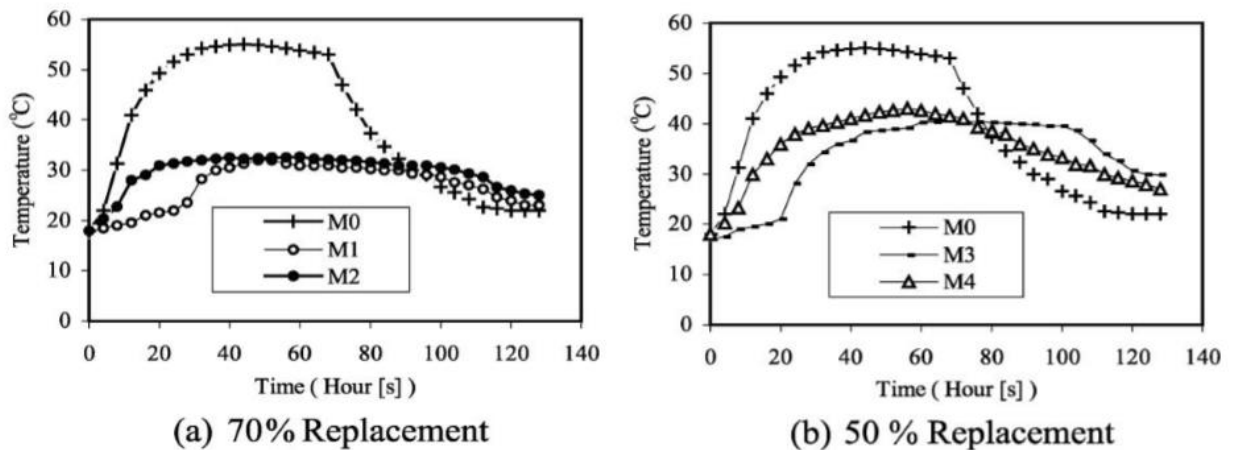
Be darbų su medžiagomis, paviršinis aušinimas gali būti atliekamas naudojant technologinius aušinimo metodus. Aušinimo metodo pasirinkimas priklauso nuo daugelio veiksnių, kurie skiriasi, priklausomai nuo projekto.

1.3.1. Cemento kiekio mažinimas

Labiausiai naudojamas užpildas yra kalkakmenis. Tai yra inertiškas užpildas, kuris nereaguoja su vandeniu betono viduje, todėl neprisideda prie šilumos išsiskyrimo. Šio užpildo trūkumas – nesuteikia betonui pakankamo stiprumo.

Silicio dioksido mikrodulkės sulėtina cemento hidrataciją esant mažam cemento kiekiui vandenyje. Iš dalies jis sunaudoja į mišinį įpiltą vandenį, todėl susidaro tešla, trukdanti vandeniui liestis su cemento dalelėmis. Todėl sumažėja hidratuoto cemento kiekis, o hidratacijos proceso laikas prailgėja. Tačiau padidėjus vandens kiekiui, silicio dioksido mikro dulkės nesugeba sudaryti rišamosios užtvoros ant cemento dalelių, kurias supa vanduo ir todėl gali laisvai reaguoti. Esant dideliame vandens cemento santykiui, betonas su silicio dioksido mikro dulkėmis reaguoja greičiau, užuot prailginęs hidratacijos procesą.

Lakieji pelenai yra inertiška medžiaga, daugiausia naudojama kaip tam tikras cemento kiekis. masyviose konstrukcijose, siekiant sumažinti cemento hidratacijos metu susidarancią šilumą. Pakeitus cementą lakiais pelenais, temperatūros pakilimas betone sumažėja dėl mažesnio cemento kiekio, galinčio reaguoti su vandeniu, santykio. Be to, kad sumažėja cemento kiekis, lakiųjų pelenų pozolaninės savybės lemia ir kitų betono savybių pagerėjimą. Atiš [29] atliko tyrimą, kuriame buvo palyginti skirtingi betono mišiniai. 7 pav. pateikiami skirtingi kiekvieno mišinio komponentai. M1 ir M2 betonuose yra 70% lakiųjų pelenų, o M3 ir M4 – 50 % lakiųjų pelenų [29].



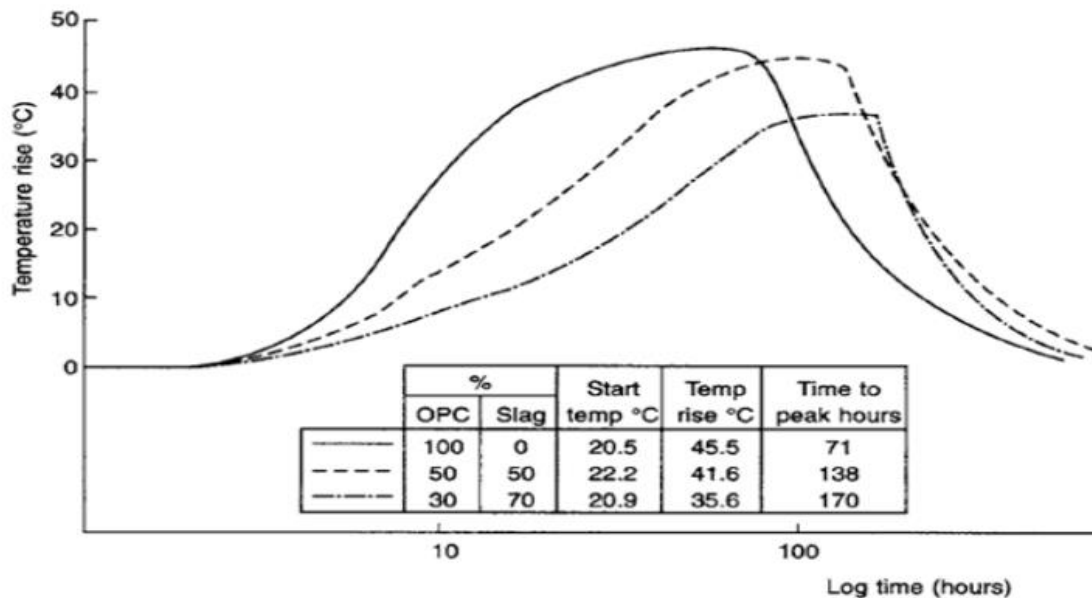
7 pav. Skirtingų betono mišinių palyginimas

Atiš'o [29] rezultatai rodo, kad jei cementas pakeičiamas 50 % lakiųjų pelenų, temperatūros ekstremumas sumažės nuo 55 °C iki maždaug 42 °C (žr. 7 pav.). Tai net 23 % piko temperatūros sumažėjimas. Autorius taip pat užsimena, kad esant nedideliam 20–30 % lakiųjų pelenų kiekiui, temperatūros ekstremumas gali būti maždaug sumažintas 10–15 %.

Be temperatūros mažinimo, pagerėja ir kitos betono savybės. Bandymai parodė, kad betonas, turintis didelį lakiųjų pelenų kiekį kaip cementas, yra nelaidus vandeniui ir mažiau porėtas, o tai yra papildomas pranašumas [29].

Mokslininkai nustatė, kad hidratacija žymiai sulėtėja kombinuojant tarpusavyje silicio dioksido mikro dulkes ir lakiuosius pelenus. Silicio dioksido garai sulėtina hidrataciją esant nedideliame vandens cemento kiekiui, tuo tarpu jis padidėja, augant vandens cemento santykiui. Tačiau, esant didesniame vandens cemento santykiui, lakieji pelenai sulėtina hidrataciją ir taip mažinamas šilumos išsiskyrimas, nes kylant piazolanų kiekiui, nes jame yra lakiųjų pelenų ir silicio dioksido mikro dulkių, kurie sumažina Ca^{2+} jonų koncentraciją, betono pH sumažėja. Tai lemia mažiau kalcio hidroksido, kuris katalizuoja silicio dioksido garų reakciją [30].

Šlakas ilgai reaguoja su vandeniu, kai yra naudojamas vienas. Tačiau kai jis naudojamas kartu su cementu, jis turi gerų savybių tiek šviežiam, tiek sukietėjusiam betonui. Pridėjus šlako, cemento kiekį galima žymiai sumažinti, o tai yra pirmasis žingsnis sumažinant hidratacijos metu susidariusią šilumą. Pirmajame rišiklio reakcijos etape tik cementas reaguoja su vandeniu, nes dėl jo struktūros blokuojamos šlako reaktyviosios savybės. Kai prasideda cemento hidratacija, susidaro kalcio silikato hidratatai (CSH). Gauti sulfatai ir (arba) šarmai atlieka šlako reakcijos katalizatoriaus vaidmenį. Kol šlakas pradeda reaguoti su aktyvacijos produktais, betono pH padidėja, kol pasiekia kritinę vertę, kuri sutrikdo šlako savybes. Kai ši vertė pasiekiamą, prasideda šlako ir vandens reakcija. Tai lemia cementinių produktų iš šlakų gamybą. 8 pav. parodyta betono mišinių, turinčių skirtingą šlakų kiekį, temperatūros kitimas. Betonai, kuriame yra 50 % ir 70 % šlako, lyginami su betonu, kuriame yra tik portlandcemenčio. Didėjant šlako daliai, galima pastebėti, kad reakcija vėluoja ir temperatūros kreivės tampa lygesnės. Esant 70 % šlakui, maksimali temperatūra sumažėja maždaug 10 °C, o keičiant 50 % cemento - ji sumažėja tik 4 °C, nes, esant dideliame šlakų kiekiui, temperatūra kyla lėčiau [31].



8 pav. Temperatūros pokyčių skalė, priklausomai nuo šlako kiekio.

1.3.2. Technologiniai aušinimo metodai

Siekiant sumažinti temperatūrų skirtumus tarp konstrukcijos vidaus ir išorės, masyvaus betono konstrukcijose (pvz.: užtvankų, tiltų atramų statymui) gali būti technologiškai įrengiamas išankstinis aušinimas vandeniu arba ledu ir aušinimas vamzdžiais.

1.3.2.1. Išankstinis aušinimas vandeniu arba ledu

Išankstinis aušinimas atliekamas prieš pilant betoną, naudojant šaltus užpildus, atšaldytą vandenį ar bet kokiu kitu būdu mažinant pilamo betono temperatūrą. Dažnai aušinimui naudojamas ledas. Toks aušinimo metodas pirmą kartą buvo naudojamas statant „Norfolk“ užtvanką 1940-ųjų pradžioje. Betono mišinyje naudoti šaltą vandenį ar ledą yra efektyviau nei naudoti aplinkos temperatūros vandenį [32]. Ledo naudojimas dideliu kiekiu, pakeičiant vandenį betono mišinyje, prisideda prie betono liejimo temperatūros sumažėjimo. Tai leidžia kompensuoti cemento hidratacijos metu išsiskiriančią šilumą ir taip apriboti betono temperatūros kilimą. Šis betono aušinimo būdas yra efektyvus tuo, kad sumažėja temperatūros skirtumas konstrukcijos viduje. Todėl sumažėja šiluminio įtrūkimo rizika. Tačiau įrengti ledo gamybos įrenginį, skirtą tik betonui maišyti, yra brangu. Be to, svarbu, kad betono gamykla atsižvelgtų į pridėto ledo kiekį kaip į pradinį vandens kiekį, kuris turėjo būti naudojamas norint išlaikyti pastovų vandens cemento santykį. Tai svarbu norint gauti geros kokybės ir nepralaidžią vandeniui struktūrą.

Anot Takeuchi, Tsuji ir Nanni [33], sauso ledo naudojimas, norint sumažinti betono pradinę temperatūrą yra viena iš geriausių išankstinio aušinimo priemonių. Taip yra dėl to, kad jame yra didelė latentinė šiluma, lygi 137 kcal / kg. Be to, nedideli sauso ledo gabaliukai (nuo 1 mm iki 2 mm) vėsina efektyviau nei didesni. Didelių sauso ledo gabalų garavimo yra ilgesnis. Takeuchi, Tsuji ir Nanni [33] atliko bandymus, kad įvertintų sausojo ledo, kaip betono aušinimo metodo, efektyvumą pakavimo įmonėje. Rezultatai rodo, kad šis metodas yra patikimas, o vėsinimo efektyvumas buvo nuo 61 % iki 70 %. Tai reiškia, kad norint sumažinti temperatūrą 1 °C 1/m³ betono, reikia 7 kg sauso ledo. Be to, pagerėjo sukietėjusio betono savybės. Aušinto betono sausuoju ledu stipris gniuždant 9 1 dieną buvo 15 % didesnis nei neatšaldyto betono.



9 pav. LN vėsinimo tipinis pritaikymas aikštelėje

1.3.2.2. Aušinimas vandens vamzdžių sistemomis

Taikant vamzdžių aušinimo metodą į betono konstrukciją montuojama vamzdžių linija, kad kietėjimo metu vamzdžiais galėtų praeiti šaltas vanduo ir taip sumažintų vidinę konstrukcijos temperatūrą. 3-iojo dešimtmečio pradžioje pirmasis didelis vėsnio aušinimo panaudojimas buvo dokumentuotas statant Hooverio užtvanką JAV [34]. Mažinant ankstyvosios stadijos betono hidratacijos šilumos kiekį, vamzdžių aušinimo metodas yra labai efektyvus būdas, siekiant sumažinti šiluminius įtrūkimus. Dažnai masyvaus betono konstrukcijų statybose naudoja šį metodą, nes jis gali greitai sumažinti vidaus temperatūrą iki žemesnės vertės nei lauko temperatūra. Vamzdžių aušinimo metodui nereikia keisti mišinio savybių ar atlikti papildomų kokybės kontrolės bandymų, tuo pačiu siūlant hidratacinės šilumos mažinimo pranašumą. Tačiau jam reikia sudėtingų montavimo darbų, taip pat papildomo statybos laiko ir išlaidų. Pasak Qiang'o, Chi ir Zhong'o [35], pagrindiniai kriterijai, turintys įtakos vamzdžių aušinimo sistemos efektyvumui, yra šie:

- Vandens srautas ir kryptis vamzdžių viduje;
- Pradinė vandens temperatūra;
- Vamzdžių išdėstymas ir tarpai;
- Vamzdžių charakteristikos, tokios kaip skersmuo, ilgis ir medžiaga;
- Aušinimo sekos.

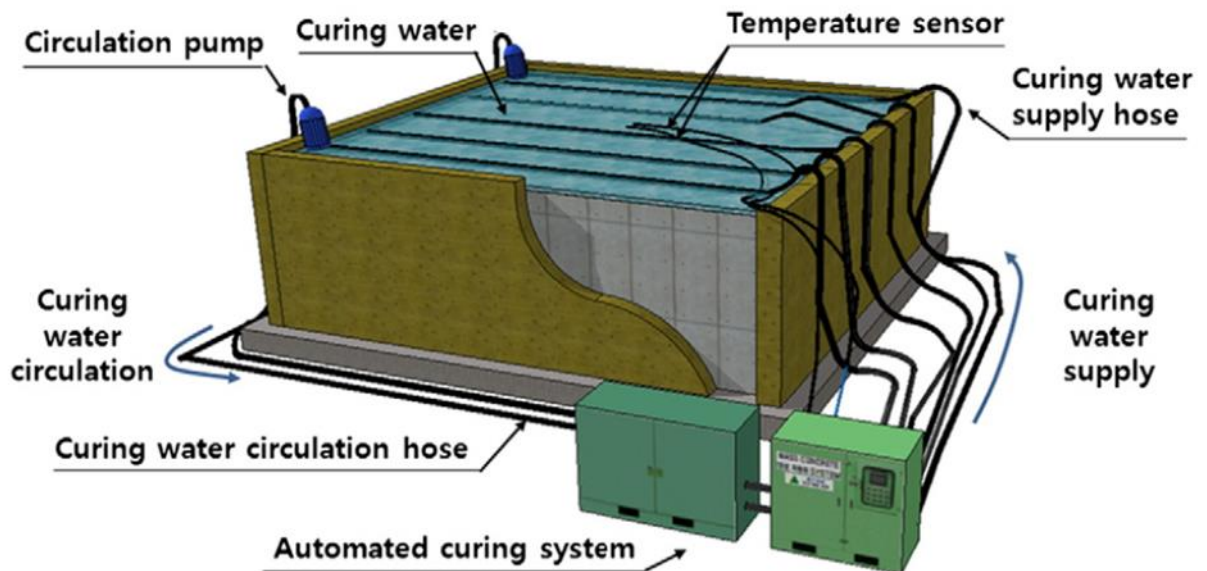
Vandens srautas turėtų būti nustatytas taip, kad vamzdžiuose būtų gera vandens apykaita. Vėsinimo metu vanduo pašildomas absorbuojant šilumą iš betono hidratacijos. Jei srautas nėra pakankamai didelis, vanduo pasiekia maždaug betono temperatūrą. Todėl šilumos perdavimas tarp vandens ir

betono nebeįmanomas. Tai lemia mažesnę aušinimo sistemos efektyvumą [36]. Vamzdžio medžiagos pasirinkimas yra labai svarbus. Vamzdžiai turėtų būti mažai atsparūs karščiui. Varža priklauso nuo šiluminės charakteristikos ir nuo vamzdžio matmenų. Taigi medžiaga turėtų turėti didelį šilumos laidumą, kad būtų lengviau šilumos perduoti iš betono į vandenį per vamzdžio sienelę. Kalbant apie vamzdžių matmenis, geriau turėti daug mažų vamzdžių, nei keletą didelių. Rezultatai, gauti naudojant daugiau mažo skersmens vamzdžių yra geresni nei rezultatai, gauti naudojant didesnio skersmens vamzdžius. Didėjant vamzdžių skaičiui, padidėja paviršius, besiliečiančio su šildomuoju betonu, plotas. Taigi aušinimo galia taip pat yra didesnė, nes daugiau šilumos sugerama [36]. Šio aušinimo metodo trūkumas yra tas, kad betone aplink aušinimo vamzdžius gali atsirasti didelių įtrūkimų dėl didelio vamzdžiuose cirkuliuojančio vandens ir betono temperatūrų skirtumo. Šis temperatūros gradientas sukuria didelius tempimo įtempimus, kurie gali sukelti įtrūkimus. Tačiau sumažinus vandens srautą, įtampą ir taip plyšių susidarymą aplink vamzdžius galima sumažinti. Betonas bus aušinamas lėtai. Todėl reikėtų rasti pusiausvyrą tarp efektyvios aušinimo sistemos ir kuo mažesnio įtempimo šalia vamzdžių [37].

Nors vanduo dažniausiai naudojamas kaip aušinimo skystis, tam gali būti naudojamas ir oras. Tačiau aušinimas oru rodo, kad vamzdžių skersmuo turi padidėti, kad būtų pasiektas efektas [38]. Taip yra dėl to, kad savitoji vandens šiluminė talpa yra didesnė nei oro. Pavyzdžiui, esant 25 °C, savitosios vandens ir oro šiluminės talpos yra atitinkamai 4,18 ir 1,005 kJ /kgK. Taigi efektyviam aušinimui reikalingas didelis oro kiekis. Statant tiltus ir kitas masyvias konstrukcijas, oro sąnaudos bus daug brangesnės, todėl lengviau naudotis šaltu vandeniu.

Tyrėjai ieško efektyvių ir optimalių šio metodo panaudojimo būdų. Ha ir kt. [39] pasiūlė naują automatizuotą betono kietėjimo sistemą, kuri palaiko pastovų 20 °C temperatūrų skirtumą tarp vidinės ir išorinės konstrukcijos temperatūros, kad būtų kuo labiau sumažinti šiluminiai masyviojo betono įtrūkimai.

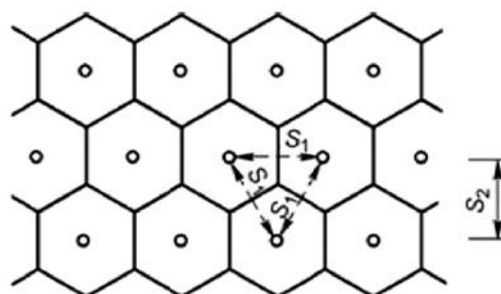
10 pav. pateiktą automatinę kietėjimo sistemą pirmiausia sudaro dvi dalys. Viena dalis yra temperatūros reguliavimo sistema, sudaryta iš temperatūros jutiklio, duomenų kaupiklio, valdymo pulto ir šildymo aparato. Kita dalis yra vandens cirkuliacijos sistema, sudaryta iš vandens talpyklų, siurblio, tiekimo arklų ir kietinimo kilimėlio. Temperatūros reguliavimo sistema matuoja betono konstrukcijos centrinę temperatūrą ir paviršiaus temperatūrą, naudodama terminius jutiklius, įdėtus prieš betoną. Kai temperatūros skirtumas tarp vidaus ir paviršiaus viršija įtrūkimų kontrolės kriterijų (paprastai 20 °C), vandens cirkuliacijos sistemos tiekimas automatiškai įkaitina vandenį prie konstrukcijos paviršiaus, kad sumažėtų temperatūros skirtumas. Atitinkamai, automatizuota kietėjimo sistema gali veiksmingai sumažinti šiluminius įtrūkimus be jokių konstrukcinių pažeidimų. Tačiau šis aušinimo metodas komplikuojasi dėl vandens tiekimo ir jo kiekio.



10 pav. Automatinės vėsinimo sistemos schema

Analizuojant literatūroje pateiktą vamzdžių aušinimo metodą, nustatyta, kad skirtingi autoriai nurodo skirtingus duomenis apie vamzdžių skersmenys arba apie tarpus tarp vamzdžių. Pavyzdžiui, Lagundžija ir Thiam'as [40] savo darbe naudojo tinklą su aštuoniomis eilėmis ir keturiais stulpeliais, suteikiant tarpą tarp vamzdžių vertikalia kryptimi 0,5 m ir horizontaliu atstumu 0,375 m. Vamzdžio skersmuo buvo 25 mm, ilgis 8 m, vandens įėjimo temperatūra 5 °C, o oro srautas - 0,5 kg/s, tuo tarpu vandens išleidimo temperatūra neturėjo būti didesnė kaip 4 °C aukštesnė nei vandens įleidimo temperatūra.

Kiti mokslininkai, Aniskin'as ir Chuc'as [41] teigia, kad vamzdžio skersmuo daugiausia turi būti lygus 25 - 35 mm. 11 pav. parodytas geriausias sistemos vamzdžių išdėstymas. Šiuo atveju aušinamojo masyvo elementai yra skaidomi į šešiakampius. Horizontalus S1 aušinimo vamzdžių žingsnis (11 pav.) paprastai laikomas 1,5 - 3,0 m. Tada, norint užtikrinti tokią ribą, vamzdžių žingsnis aukščiui $S_2 = S_1$ yra kampas $\cos 30^\circ$ (11 pav.). Norint supaprastinti vamzdžių aušinimo sistemos klojimo procesą, naudojamas paprastesnis ir pigesnis, nors ir mažiau efektyvus, būdas, masyvą išskirstyti stačiakampiais plotais.

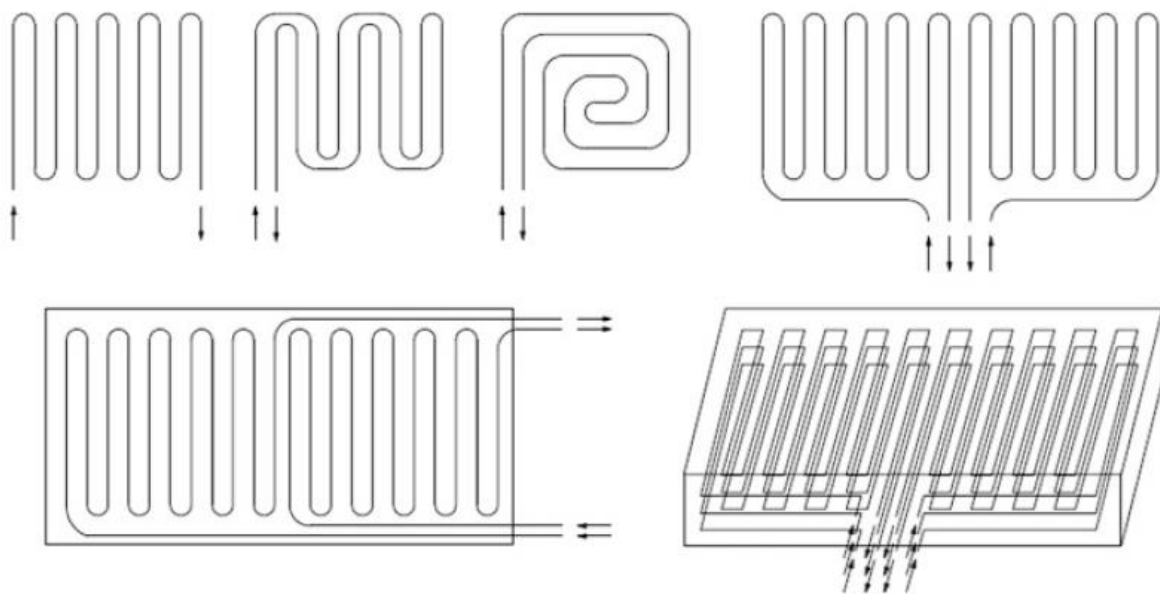


11 pav. Masyvo išskirstymas šešiakampiais plotais

Didžiojoje dalyje literatūroje nurodomų aušinimo vandeniu naudojimui parenkami 2,54 cm skersmens plieniniai vamzdžiai, kurių sienelių storis siekia vos 1,5 mm. Aliuminio vamzdžių alternatyva yra rekomenduojama naudoti tik vėsinant, jei trunka mažiau nei 3 mėnesius, nes šie gali

reaguoti su cemento šarmais. Dar galima dėti PVC, polietileno ar kitus plastikinius vamzdžius, tačiau norint išvengti nepageidaujamų pažeidimų, rekomenduojama ypač atidžiai stebėti taikomą vamzdynų sistemos mechaninį stiprumą. Be to, kad plastikiniai vamzdžiai yra pigesni nei plieniniai vamzdžiai, jų šilumos laidumas yra mažesnis, todėl sumažėja tekančio skysčio šilumos absorbcija palei įdėtą vamzdžio kelią. Šis pranašumas leidžia pritaikyti ilgesnes vamzdynų sistemas (t. y. mažiau įleidimo / išleidimo angų), tačiau jis taip pat turi trūkumą, palyginti su plieninių vamzdžių aušinimo galia. Plastikinių vamzdžių pranašumas paprastai yra lankstus, todėl juos galima daug lengviau ir greičiau uždėti nei plieninius vamzdžius (kuriems reikia „movų“, „alkūnių“ ir kt.), Tačiau liejimo metu jie gali būti labiau pažeidžiami nenumatytų veiksnių.

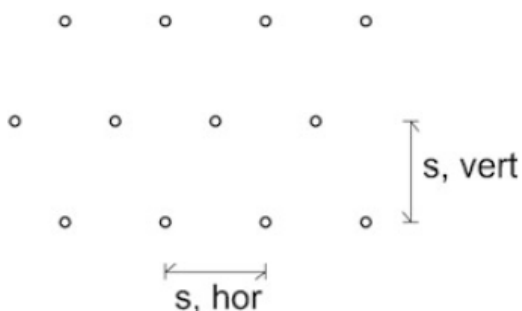
Masyviose betoninėse konstrukcijose, kur atliekamas sluoksniuotas liejimas, aušinimo vamzdžiai paprastai dedami kiekvienos liejimo fazės viršutiniame lygyje, atitinkančiame tolesnės liejimo fazės apatinę plokštumą. Ši parinktis dažniausiai yra susijusi su vamzdžių pritaikymo paprastumu ir galimais papildomais sunkumais, su kuriais susidurtų laikant vamzdžius vidutiniame lygyje, nes masyviose betoninėse konstrukcijose paprastai nėra pakankamo vidinio sutvirtinimo tokio kaip atramos. Tipinius vamzdžių išdėstymus galima pamatyti 12 pav. Efektyvumas yra susijęs su vamzdžių išdėstymu ir atskirų vamzdžių tinklų skaičiumi. Iš tikrųjų masyviame betone gali būti naudojamos kelios nepriklausomos vamzdynų sistemos (tiek horizontaliai, tiek vertikalios).



12 pav. Vėsinimo vamzdelių išdėstymo variantai

Horizontalus atstumas tarp gretimų vamzdžių skiriasi atsižvelgiant į šiluminę konstrukciją. Tačiau, remiantis CIRIA C660 [42], dideliuose mažai karšto betono liejiniuose paprastai yra 1,0 m atstumai ir priešingai, kai naudojamas betonas su dideliu kiekiu cemento - mažesni, maždaug 0,5 m atstumai. Šių, santykinai mažų, atstumų priežastis yra susijusi su maža betono šilumine difuzija, dėl kurios kiekvieno vamzdžio įtakos zona ankstyvoje betono stadijoje yra nedidelė. Tiesą sakant, jei vamzdžių įdėjimas būtų susijęs tik su betono aušinimo jungčių sandarinimo tikslais, tarpą būtų galima lengvai padidinti iki 2-3 m, nes tokiais atvejais aušinimas gali būti daug lėtesnis (nėra konkurencijos su hidratacijos šilumos vystymosi tempu).

Esant optimalioms sąlygoms, horizontalūs ir vertikalūs vamzdžių tarpai turėtų būti vienodi, o cilindrų išdėstymas, kaip parodyta 13 pav. Tačiau tai ne visada įmanoma dėl aukščio suvaržymų.



13 pav. Vamzdelių išdėstymas optimaliam darbui

Vandens srautas paprastai fiksuojamas tarp 15–17 l/min. Vamzdžiuose cirkuliuojantis vanduo paprastai gaunamas iš natūralaus šaltinio, pvz., upės (gana lengva tam tikru užtvankos atveju), taikant tinkamas filtravimo priemones, kad būtų išvengta siurblynės / vamzdynų sistemos užsikimšimo. Naudojant upės vandenį, natūrali vandens temperatūra paprastai yra tinkama betonui aušinti [42]. Nors žinoma, kad aušinimo pajėgumas gali būti padidintas didinant vamzdžio skersmenį, naudojant didesnę vandens greitį ir mažinant vandens temperatūrą, būtina atsižvelgti į tai, kad per didelis vėsumas gali sukelti šiluminį šoką betonui, supančiam aušinimo vamzdžius. ir sukelti šiluminius įtrūkimus aplink vamzdžius. JCI (2012) rekomendacijos nurodo didžiausią leistiną cirkuliuojančio vandens ir jį supančio betono temperatūros skirtumą – 20 °C.

Pagal ICOLD'o [43] rekomendacijas, kad būtų išvengta šiluminio įtrūkimo, pirmąsias 3–4 savaites po vamzdelių sumontavimo, betono aušinimo greitis neturi viršyti 0,5 °C per dieną.

1.4. Temperatūros pasiskirstymo modeliavimas

Nors vandens vamzdžių aušinimo sistemoms yra supaprastinti projektavimo metodai, jie daugiausia taikomi aušinimo laikotarpiui. Supaprastinti sprendimai, kurie buvo pasiūlyti konkrečiam kontekstui ankstyvojoje cemento hidratacijos stadijoje [44] vis dar yra labai riboti. Tiksliausias projektavimo ir optimizavimo būdas taikant vandens vamzdžių aušinimo sistemas yra aiškus erdvinis temperatūros raidos modeliavimas, kuris dažniausiai pasiekiamas naudojant baigtinių elementų metodą. Skaitmeniniai modeliavimo įrankiai leidžia aiškiai imituoti šilumos srautus, vykstančius tarp betono ir įterptų vamzdžių, o tai leidžia apskaičiuoti vandens temperatūros padidėjimą palei aušinimo vamzdį.

Šeštojo dešimtmečio pabaigoje mokslininkai keletą kartų bandė apskaičiuoti šiluminius įtempius dėl ankstyvo amžiaus hidratacijos šilumos. Tuo metu buvo atsižvelgiama į betono temperatūrą ir standumą, kai betono mišinys iš pusiau skystos būsenos virsta kieta. Didžiausias sunkumas buvo tas, kad 3D kūno suvaržymo laipsnio nebuvo galima apskaičiuoti taikant įprastą metodiką [45].

Pastaraisiais metais tyrėjai bandė išspręsti šią problemą naudodami įvairias kompiuterines programas. „ConcreteWork“ yra nemokama programinė įranga, leidžianti numatyti masyvios betoninės konstrukcijos temperatūros pasiskirstymą ir įtrūkimų indeksą [46]. Atliekant „ConcreteWork“ analizę, hidratacijos šilumą galima apskaičiuoti pateikiant mišinio sudėtį ir proporcijas, cemento ir užpildo tipus. Tačiau Bobko [47] nustatė, kad temperatūros pasiskirstymo prognozės yra netikslios.

Buvo nurodyta, kad tarp „ConcreteWork“ modelio ir eksperimentinio matavimo hidratacijos šilumoje buvo nustatytos didelės paklaidos. Be to, „ConcreteWork“ negali atlikti 3D streso analizės [47].

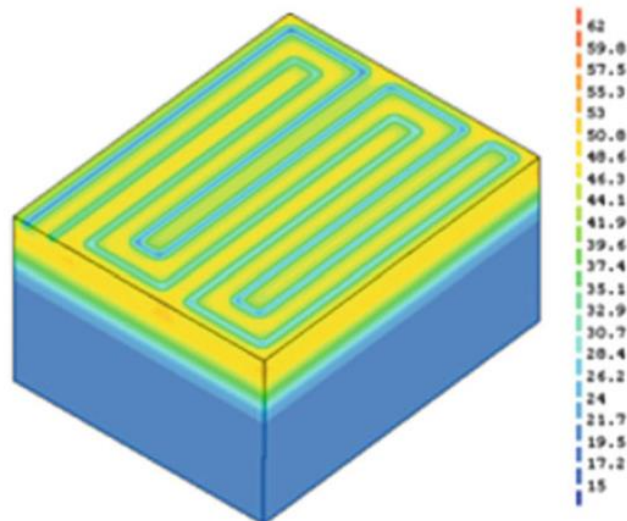
Pastaruoju metu informacinių technologijų pažanga leidžia kurti baigtinių elementų modelius šilumos ir įtempių analizei, siekiant prognozuoti ankstyvojo amžiaus betono elementų temperatūrą ir įtempių raidą.

Floridos ir Šiaurės Karolinos transporto departamentas, naudodamas programinę įrangą „TNO DIANA“, atliko tyrimų programas, skirtas įvertinti šiluminį įtempį masiniame betone [47, 48]. TNO DIANA pateikė modulį, specialiai sukurtą šiluminio įtempio analizei. Tačiau ankstyvojo amžiaus betono slinkimo elgesio modeliavimas jų dokumente nebuvo nurodytas. Lee ir kt. [49] ir Aniskin'as [50] paskelbė savo šiluminio įtempio analizės rezultatus naudodami „Midas Civil“ programinę įrangą. Tačiau rezultatai buvo netikslūs dėl šių dviejų priežasčių: temperatūros poveikis medžiagų savybėms nebuvo vertinamas; nebuvo atsižvelgta į temperatūros poveikį hidratacijos šilumai. Wu ir kt. [51] sukūrė modelį naudodamas ANSYS, kuriame atsižvelgiama į savybių pokyčius betono hidratacijos metu, taip pat į temperatūros poveikį hidratacijos šilumai. Imituoti paviršiaus šilumos nuostolius taip pat buvo naudojamas paviršiaus konvekcijos modelis. Tačiau vis tiek reikėjo patobulinti modeliuojant sąsajų sąlyčio savybes (pvz., klijinių ir betono sąsajas) ir ankstyvojo amžiaus betono slinkimo elgesį.

Siekiant tikslių prognozių dėl masyvių betoninių konstrukcijų šiluminio pasiskirstymo ankstyvoje hidratacijos stadijoje, 3D kompiuterinių programų tobulinimas vyksta nuolat. Lin [52] sukūrė baigtinių elementų modelius, naudojant ABAQUS programinę įrangą su FORTRAN paprogramėmis, siekiant numatyti šiluminio įtempio raidą ankstyvoje betono elementų hidratacijos stadijoje. FORTRAN paprogramis (DFLUX) buvo koduojamas, kad būtų galima įtraukti į skaičiavimus medžiagos savybės ir šiluminės apkrovos funkciją. FORTRAN paprogramis (USDFLD) buvo sukurtas ir įgyvendintas atsižvelgiant į elastingumo modulio pokyčius hidratacijos metu ir ankstyvojo amžiaus betono visko elastingumą. Autorius skaičiuotinus rezultatus sulygino su eksperimentiniais ir savo darbe teigia, kad rezultatai tiksliai koreliuoja. Nguyen air kt. [53] sukūrė naują daugiafizinę sistemą, pagrįstą fazės lauko modeliu, skirtą įtrūkių mechanizmo kompleksiniam modeliavimui, kuri sukelia ankstyvoje hidratacijos stadijoje susidarantys temperatūriniai įtempiai. Autoriai teigia, kad šis skaitinis indėlis yra atspirties taškas, kuris modeliuoja hidratacijos procesą naudojant chemo-termo-mechaninę jungtį.

Švedijos mokslininkų modeliavimo su HACON programine įranga tikslas buvo išgauti lygią kreivę ir per daug neatšaldyti betono. Jie pripažino, kad modeliavimui galėtų būti naudojamas didesnis aušinimas, taip pat kiti vamzdžių išdėstymai, tačiau vamzdžių išdėstymas HACON programa yra ribotas dėl to, kad vamzdžius reikia priskirti mazguose, kurie dedami į konstrukcijos tinklo kampus. Jei būtų naudojamas per plonas tinklis, modelis neveiktų, o jei per didelis - rezultatai gali būti prastos kokybės. Todėl tik vienas atvejis su aušinimo vamzdžiais buvo imituojamas su bendru atstumu tarp vamzdžių [40].

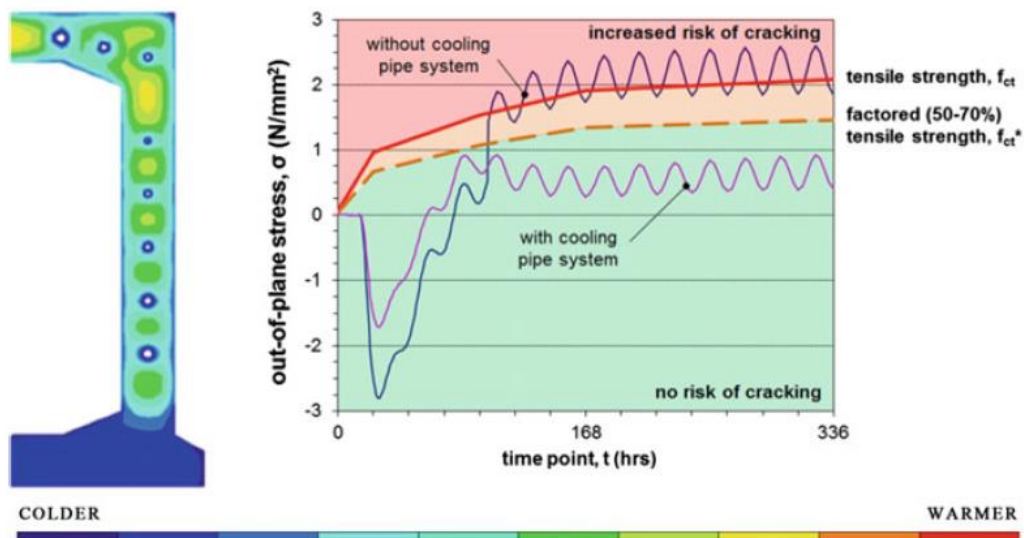
Fig. 6.5 Temperature map of a mass concrete element at the age of 30 h after casting: cutaway view through the place of the cooling pipes [Units: °C]—study made at the University of Minho (unpublished)



14 pav. Temperatūros pasiskirstymas vėsiamame betono elemente

Tokio skaičiavimo pajėgumo pavyzdys - masinio betono elemento temperatūros žemėlapis vaizdas per aušinimo vamzdžių plokštumą (žr. 14 pav.). Paveiksle lengvai atpažįstamas aušinimo vamzdžių poveikis betono temperatūrai, taip pat aušinimo vamzdžių įleidimo ir išleidimo angos, stebint kylančią temperatūrą palei vamzdį.

Tipinis panardinto tunelio galerijos sienos modeliavimo pavyzdys pavaizduotas 15 pav. Akivaizdu, kad aušinimo vamzdžių sistemos įdėjimas į sieną yra suprojektuotais atsižvelgiant į geometrinius ir veikimo parametrus, naudojant specialią FEA programinę įrangą, kuri leidžia sumažinti įtrūkimų riziką.



15 pav. Tipinis panardinto tunelio galerijos sienos modeliavimo pavyzdys

Atlikus literatūros apžvalgą matyti, kad šiai dienai naudojamos kompiuterinės programos yra didelė pagalba prognozuoti masyvių betoninių konstrukcijų galimus įtrūkius dėl cemento hidratacijos proceso, tačiau gauti modeliavimo rezultatai nėra pilnai patikimi. Jei, modeliuojant konstrukcijos šiluminį pasiskirstymą hidratacijos metu, atsiranda tikimybė, kad dėl cheminių ir mechaninių procesų

susidarys įtrūkimai konstrukcijoje, tokiu atveju reikia medžiagas ir statybos technologiją derinti su prevencinėmis priemonėmis, mažinančiomis šilumos išsiskyrimą ar kontroliuojančiomis temperatūros kilimą dėl cemento hidratacijos.

1.5. Literatūros analizės apibendrinimas

Analizuojant literatūros šaltinius pastebėta, kad tema yra aktuali, nes ji pasaulio mokslininkų, įvairiais aspektais, nagrinėjama jau ilgą laiką. Vienų nagrinėti cheminiai aspektai, kitų atlikti medžiagotyros bandymai. Buvo vertinami įtempiai ir plyšių susidarymo galimybės, atlikti bandymai su aušinimo sistemomis, taip pat vystant temą atliekamas šiluminis modeliavimas ir t. t. Visi gauti tyrimų rezultatai yra vertingi ir suteikė stiprų pagrindą formuojant didžiąją dalį rekomendacijų ir gairių, įvedant specifinius reikalavimus EU standartuose ir normose.

Tačiau skirtingi tyrimai davė skirtingus rezultatus, kurių pagrindu, skirtingose šalyse veikiančios projektavimo bei statybos įmonės, priimdamos savitus sprendimus, įgyvendina esminius statinio reikalavimus, apibrėžiančius ir užtikrinančius projektuojamų, statomų ir jau pastatytų statinių kokybę.

2. Automobilinio tilto monitoringas

2.1. Rostverko konstrukcijų apžiūra prieš betonavimo darbus

Buvo atliktas automobilinio tilto monitoringas. Pirmą kartą į objektą buvo važiuota apžiūrėti konstrukcijų prieš betonavimo darbus.

Rostverko betono aušinimo ir temperatūros matavimo sistema įrengiama armavimo metu. Apžiūrėjus pamatų „griaučius“ buvo aiškiai matyti armatūros strypų, aušinimo vamzdžių, kuriais tekės upės vanduo, išdėstymas, taip pat ir temperatūros daviklių pozicijos pamate (žr. 16 pav.).



16 pav. Rostverko armatūros ir aušinimo vamzdelių išdėstymas prieš betonavimo darbus

Aušinimo sistemą sudaro 28mm skersmens plieniniai vamzdeliai, praversti per visą pamato plotį. Jie įrengiami ant pagalbinių armatūros tinklų, su minimaliu nuolydžiu. Aušinimo vamzdziai išdėstyti keturiais „aukštais“, kad pamatas būtų vėsinamas tolygiai visame tūryje. Pirmose dvejose eilėse vamzdelių išdėstyta po keturiolika, trečioje – dvylika, na o pačiame viršuje pakako keturių. Kiekvienas vamzdelis įrengtas su uždarymo sklende, kurios pagalba gali būti reguliuojamas srautas.

Aušinimo sistema prieš betonavimo darbus buvo išbandyta – patikrintas sandarumas, srauto reguliavimo ir vandens pratekėjimo galimybės.

Temperatūros matavimo sistemą sudaro temperatūros davikliai, signalą perduodami laidai ir registravimo įrenginys. Papildomai buvo įrengtas grunto temperatūros daviklis, aplinkos oro temperatūros matuoklis ir upės vandens matuoklis. Temperatūros daviklių išdėstymas:

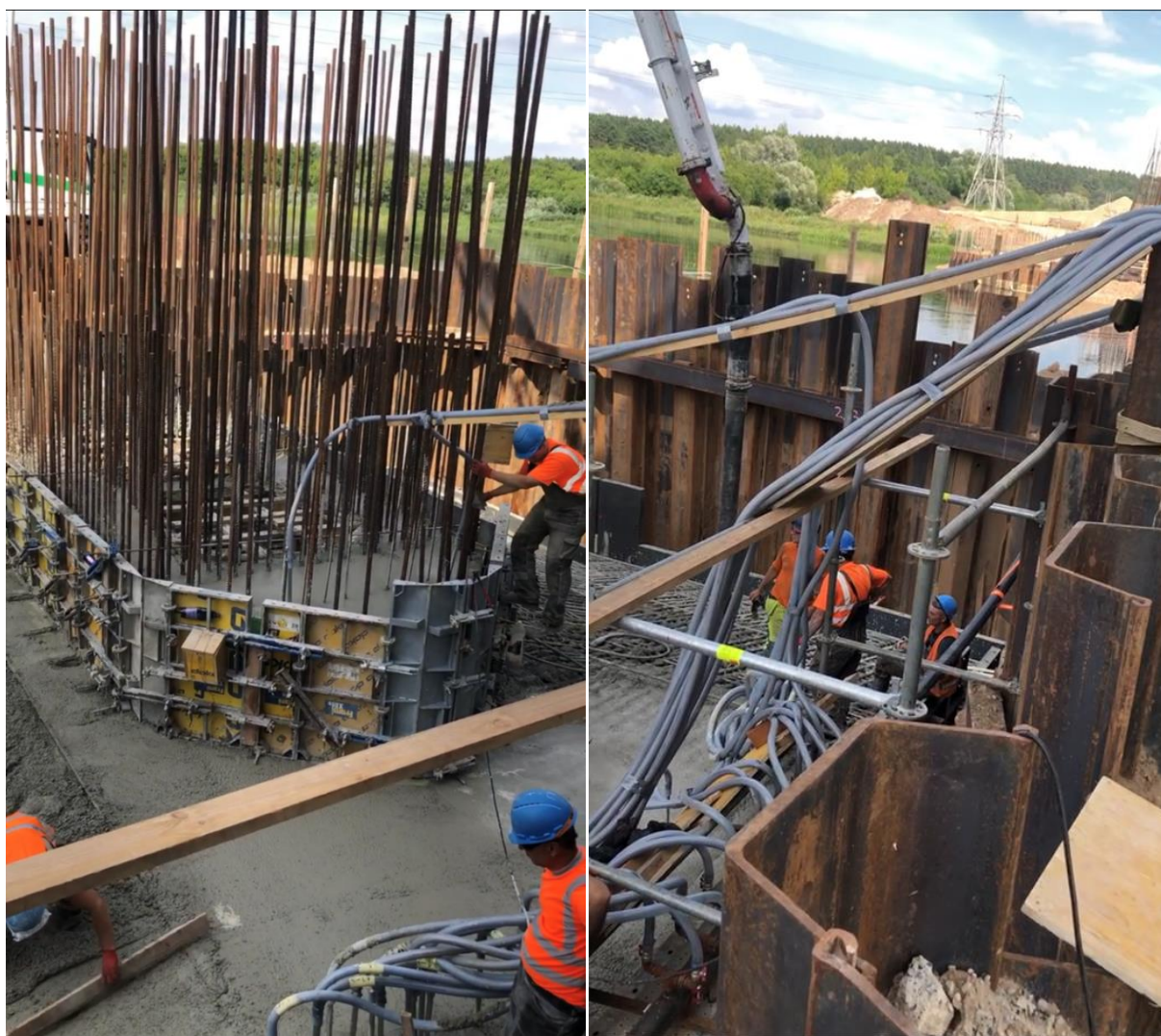
- rostverke - matuoti liejamo ir vėliau auštančio betono temperatūrai,
- po rostverku (pusės metro gylyje) – matuoti grunto temperatūrai;
- upėje (vieno metro gylyje) – matuoti upės vandens temperatūrai.

Temperatūros matavimo sistema prieš atliekamus betonavimo darbus taip pat buvo patikrinta.

2.2. Rostverko betonavimo darbai

Antrą kartą į objektą važiuota stebėti rostverko betonavimo darbų vykdymo.

Dieną prieš betonavimo darbus, buvo nustatytas grunto, aplinkos ir upės vandens temperatūros. Betonavimas buvo atliekamas vienu etapu, kartu betonuojant vieno metro aukščio tauro kolonos dalį. Kietėjimo metu betonas vėsintas pamate išdėstytais vamzdžiais cirkuliuojančiu upės vandeniu. Vandens srautas reguliuotas atsižvelgiant į pratekančio vandens ir betono temperatūrą. Betonavimo darbų metu fiksuota kas penkto betonvežio paduota temperatūra ir faktinis laikas. Žemiau pateikiama keletas nuotraukų iš stebėjimo (žr. 17 pav.).



17 pav. Rostverko betonavimo darbai

Visą hidratacijos laiką nuo betono išpylimo iki rostverko ataušimo, temperatūra pamato viduje buvo stebima ir matuojama specialiais temperatūros jutikliais, išdėstytais visame tūryje. Vanduo į aušinimo sistemą buvo paduodamas ne mažesniu nei 0,3 l/s debitu kiekvienam vamzdžiui (sistema turėjo užtikrinti galimybę padidinti debitą vienam vamzdžiui iki 0,5 l/s).

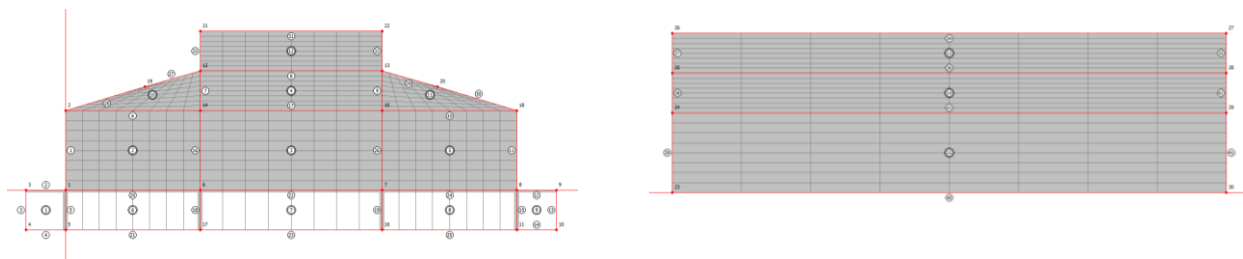
Temperatūros skirtumas tarp išorinių paviršių ir rostverko vidaus negalėjo viršyti 20 °C, o maksimaliai pasiekta kietėjimo temperatūra negalėjo viršyti 70 °C. Vėsinimą buvo galima nutraukti tik pamato temperatūrai sumažėjus iki paros oro vidutinės temperatūros.

2.3. Temperatūrinių matavimų rezultatai

Temperatūrinių matavimų rezultatai pateikiami prie priedų (žr. 1 priedą). Duomenų analizavimas ir išvados pateikiamos prie skyriaus „Šiluminis modeliavimas“, atlikus visus skaičiavimus ir gavus teorinius rezultatus palyginimui.

3. Masyvios konstrukcijos – pamato šiluminio modeliavimo metodika

Pagrindinis baigiamojo darbo tikslas buvo simuliacijos būdu (kompiuterinėje programoje HACON, kuri skirta imituoti temperatūroms ir įtempimams kietėjančiame betone), sumodeliuoti įvairius būdus, kurie mažintų masyvių konstrukcijų viduje vykstančią cemento hidrataciją bei juos palyginti. Imituotas korpusas susideda iš fiktyvios konstrukcijos, kuri yra suvaržyta apačioje, kaip parodyta 23 pav. Programa HACON gali skaičiuoti tik dvimačius uždavinius, todėl konstrukcija sumodeliuota kaip skerspjūvis ir plokštuminis pjūvis (žr. 18 pav.).



18 pav. Skerspjūvis ir plokštuma

3.1. Referencinis modelis

Modelį sudaro du tūriai – 11,4 m storio ir 3 m aukščio skerspjūvis bei 3 m aukščio ir 13,55 m pločio plokštuma. Skerspjūvyje buvo imituojama betono temperatūra ir brandumas. Tuomet duomenys iš skerspjūvio importuoti į plokštumos modelį, kad būtų galima atlikti streso simuliaciją. Tolimesniuose skyriuose pateikiama pamatinio modelio įvestis ir trumpai paaiškinti žingsniai. Šis referencinis modelis yra pateikiamas kaip gairės kitoms simuliacijoms, parodant kaip skirtingos medžiagos bei technologiniai vėsinimo sprendimai įtakoja temperatūrą konstrukcijos viduje.

3.1.1. Prielaidos

- Betonavimo darbai vykdyti Rugsjūčio pradžioje;
- Vidutinė aplinkos temperatūra tą mėnesį buvo 21 °C;
- Simuliacijoje naudotas K40 betono atitinkmuo, kuris atitinka C 35/45 betono stiprumą;
- Cemento kiekis – 437,8 kg/m³.
- Vandens ir cemento santykis yra lygus 0,55 ir yra iš anksto nustatytas programoje HACON;
- Klojiniai pagaminti iš 22 mm storio medžio plokštės;
- Poslinkis ribojamas x ir y kryptimis;
- Simuliacijos trukmė – keturiasdešimt penkios dienos, t. y. 1080 valandų;
- Vandens išleidimo temperatūra vamzdžiuose yra ne daugiau kaip 4 °C aukštesnė nei įleidimo temperatūra;
- Pradinė betono temperatūra – 15 °C.

3.1.2. Geometrija

Konstrukcija modeliuojama du kartus, skerspjūvio ir plokštumos pjūviais. Norint sukurti šiuos modelius, reikia susidėlioti mazgus, juos sujungti kreivėmis ir šiems plotams priskirti paviršius. Tolimesni žingsniai aiškinami skerspjūvio pjūviui.

3.1.2.1. Mazgai, kreivės ir paviršiai

Pirmas žingsnis – mazgų išdėstymas. Konstrukcijos mazgai išdėstyti įvairiais atstumais (neviršijant 5 metrų žingsnio tarp mazgų), padalijant konstrukciją į atskiras geometrines formas, su kuriomis patogų dirbti. Pakoregavus betonavimo trukmę skirtinguose konstrukcijos aukštingumo lygiuose, gaunama tikroviškesnė simuliacija, todėl pamato modelis suskaidomas keliais „aukštais“.

Išdėliojus mazgus, jie tarpusavyje sujungiami kreivėmis (jungiančiomis tris mazgus) arba linijomis (jungiančiomis du mazgus). Šios kreivės pateikiamos konstrukcijos išorėje ir naudojamos paviršiui priskirti.

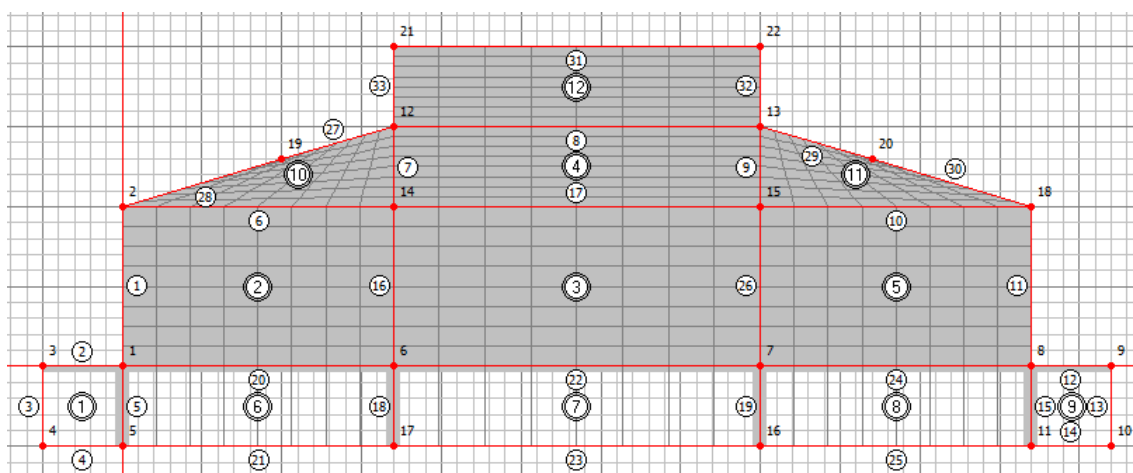
Trečias ir paskutinis žingsnis – kiekvienai daliai priskirti paviršių. Svarbu tai, kad paviršius privalo būti aptvertas keturiomis kreivėmis (linijomis), kurios žymimos prieš laikrodžio rodyklę.

Kai paviršius apibrėžtas, jam priskiriami 3, 5 arba 8 mazgų elementai. Pats pamatas turi būti sudarytas iš 8 mazgų elemento, o grunto geometrija – iš 3 ir 5 mazgų, kurie laikomi pusiau begaliniais, o jų orientacija labai svarbi tolimesniame skaičiavime.

5 mazgų elementas suvaržytas trimis kryptimis, šios kraštinės paveikslėlyje pažymėtos pilkai. Ketvirtoji kraštinė orientuota konstrukcijos apačioje, suteikiant elementui šilumos sklaidą tiesiogiai į apačią (žemę).

3 mazgų elementas suvaržytas dviem kryptimis, kraštinės modelyje pažymėtos pilka spalva. Viena pusė orientuota į apačią, kita priklauso nuo penkių mazgų elemento – privalo būti nukreipta į jį. Tai perduoda šilumos sklaidimą iš konstrukcijos kampų žemyn.

Kiekvienam iš paviršių priskyrimui tinkama elemento tipą, elementui suteikiamas tam tikras tinklelio eilučių bei stulpelių kiekis. Tinklas turi turėti kuo geresnę kraštinių santykį (kuo artimesnį 1:1). Privalu turėti omenyje, kad tinklelį pasidarius per smulkų, programa gali būti nepajėgi vykdyti simuliacijos.

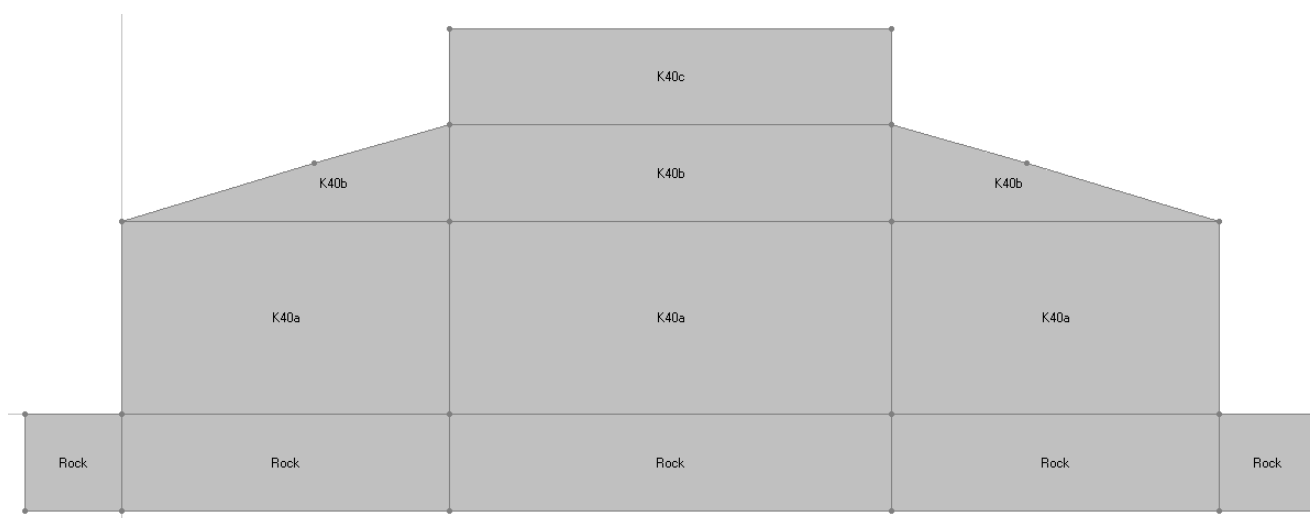


19 pav. Pamato geometrija

3.1.3. Medžiagiškumas

Nusistačius geometrinius duomenis, skirtingiems paviršiams priskiriamas medžiagiškumas (automatiškai programa konstrukcijai nepriskiria jokios medžiagos). HACON programoje yra keletas

iš anksto nustatytų medžiagų ir šios simuliacijos atveju betonui naudojama „K40“, o gruntui „Rock“ medžiagos.

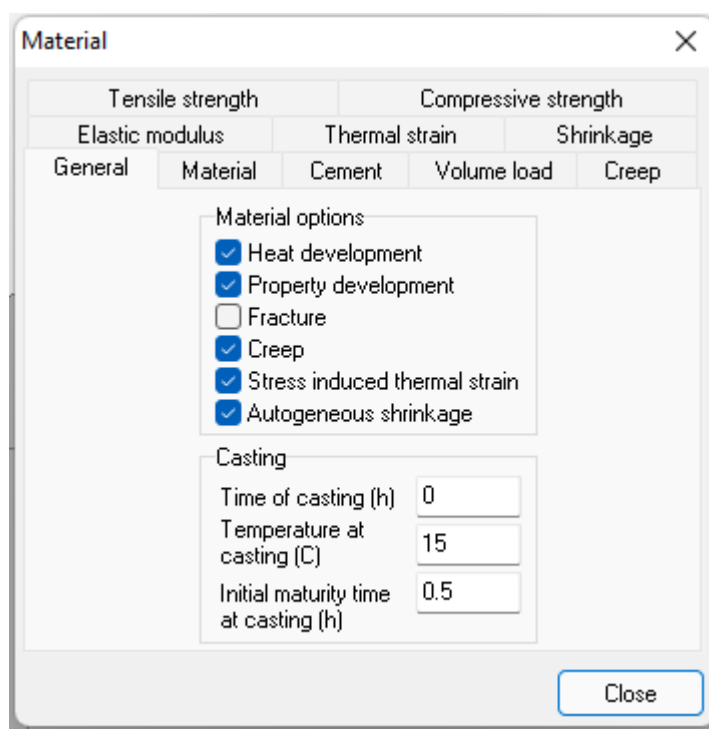


20 pav. Pamatui priskirtos medžiagos

Kaip matyti 20 pav., K40 medžiaga importuota tris kartus, nes betono pylimo laikas pamato tūryje šiek tiek skyrėsi atsižvelgiant į jo masyvumą bei aukštingumą, todėl medžiagos redaguojamos pakeičiant betonavimo pradžios laiką kiekvienam „aukštui“. Valandos priskirtos taip, kaip parodyta 2 lentelėje.

K40a buvo pradėtas betonuoti nuo pat pradžių (0h), K40b etapas prasidėjo po 8h, o paskutinis, K40c – po 10h nuo betono pylimo pradžios.

25 paveiksle pavaizduoti skirtingi ypatybių skirtukai. Šiai simuliacijai buvo keičiamos „Bendros“ ir „Cemento“ ypatybės. „Pagrindinės“ skirtuke buvo redaguojami „Liejimo laiko“, „Liejimo temperatūros“ ir „Pradinė branda liejimo metu“ parametrai. „Cemento“ skirtuke pakeistas cemento kiekis.



21 pav. Betonavimui nustatyti parametrai

2 lentelė. Užsiduotos sąlygos

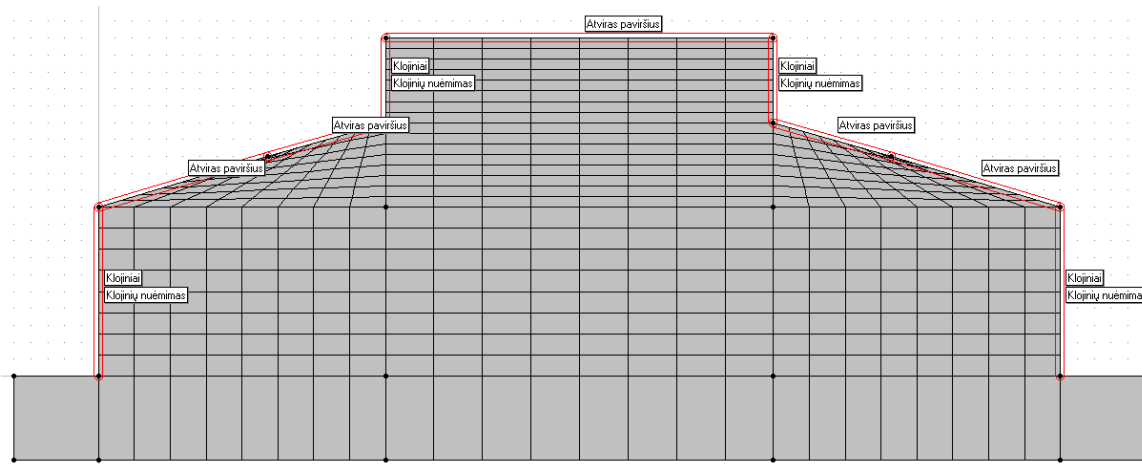
Medžiaga	Betonavimo pradžios laikas (h)	Temperatūra (°C)	Pradinis brandinimo laikas liejimo metu (h)
K40a	0	15	0.5
K40b	8	15	0.5
K40c	10	15	0.5

3.1.4. Ribinės sąlygos

HACON programoje yra šešių tipų ribinės sąlygos: temperatūros, šiluminio srauto, poslinkių, vamzdžių srauto, apkrovimo ir spyruoklių. Šios simuliacijos atveju buvo naudojami trys iš jų ir jie aprašyti apačioje.

3.1.4.1. Temperatūra

Numatyta, kad konstrukcijos betonavimas vykdomas rugpjūčio mėnesį. Vidutinė oro temperatūra tą mėnesį – 21 °C. Simuliacija buvo vykdoma 45 dienas (iš viso 1080 valandų). Kaip temperatūros ribinėms sąlygos buvo apsiraišytos šios: „Klojiniai“, „Klojinių nuėmimas“ bei „Atviras paviršius“. Sąlygų vertės išdėstytos 3 lentelėje. Laikyta, kad temperatūra ties klojiniais yra 2 °C žemesnė nei pradinė betono liejimo temperatūra.



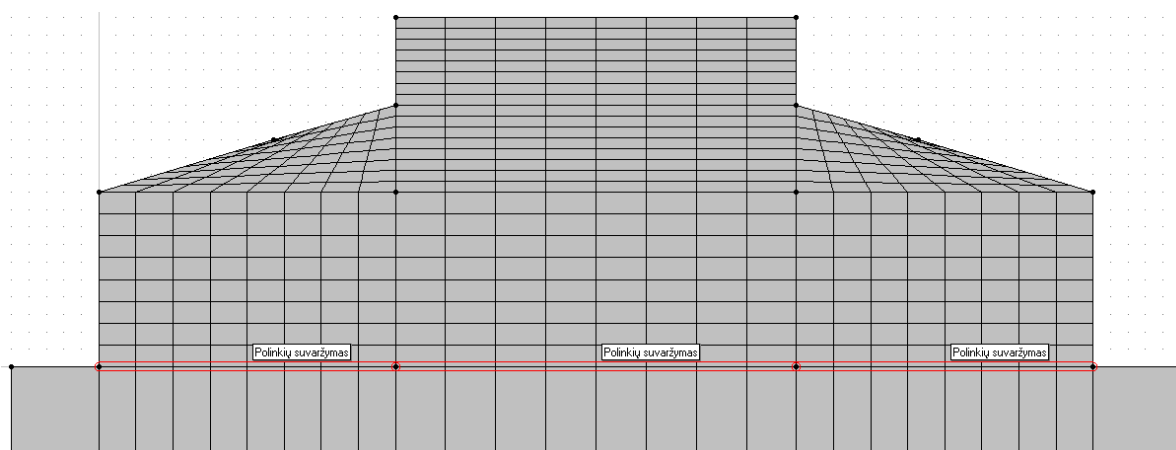
22 pav. Pamato konstrukcijos temperatūrinės ribinės sąlygos

3 lentelė. Laikas ir temperatūra skirtingoms ribinėms sąlygoms

Ribinės sąlygos	Laikas (h)	Temperatūra (°C)
Klojiniai	0-120	13
Klojinių nuėmimas	120-240	21
Atviras paviršius	0-1080	21

3.1.4.2. Poslinkiai

HACON programoje polinkius galima riboti keliomis variacijomis: x kryptimi; y kryptimi arba x ir y kryptimis kartu. Norint išvertinti blogiausią atvejį – pamatas buvo suvaržytas x ir y kryptimis (poslinkis nustatytas lygus nuliui visam terminui - nuo 0 h iki 1080 h).



23 pav. Poslinkiai, ties gruntu suvaržyti x ir y kryptimis

3.1.4.3. Tekėjimo srautas aušinimo vamzdžiuose

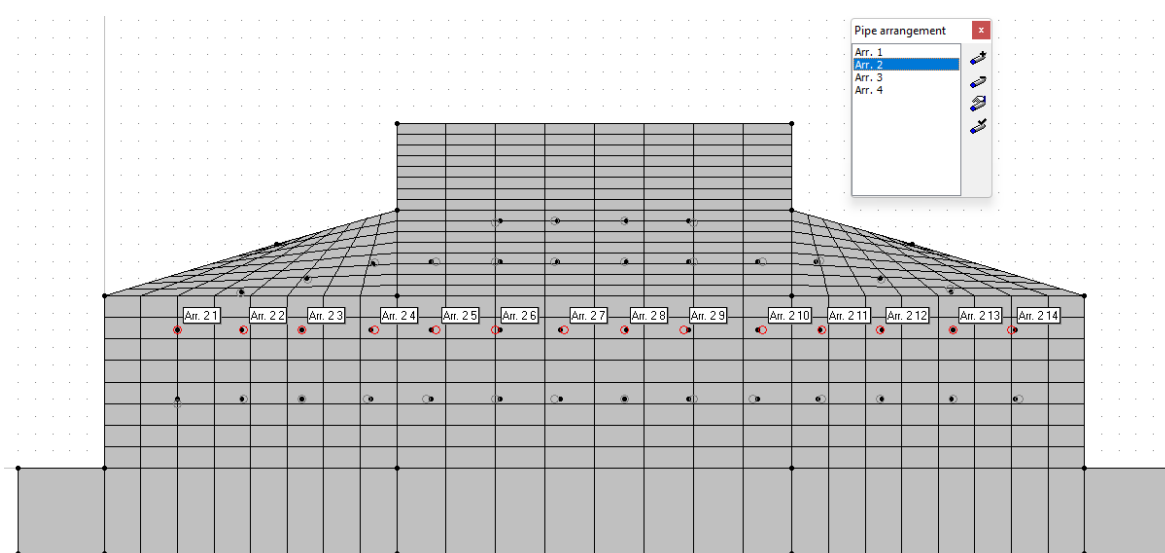
Vamzdžių srauto ribinė sąlyga modeliuojama skerspjuvyje, tačiau ši sąlyga nėra laikoma referencinio modelio dalimi, ji atsispindi tik temperatūrinių skaičiavimų rezultatuose.

Vamzdeliai išdėstomi pamate, tvirtinant juos prie tinklo keturiomis eilėmis, su 0,75 m tarpais tarp jų horizontalioje padėtyje. Vertikalios eilės išdėstytos 0,8 m, 1,6 m, 2,0 m ir 2,9 m aukščiuose. Prieš „pririšant“ vamzdelius prie tinklo, kampuose sudedami pagalbiniai mazgai.

Srautą galima apibūdinti dviem būdais – nurodant srautą vamzdeliuose arba nurodant išėigos temperatūrą. Mano tyrimo atveju buvo pasirinkta nurodyti tekėjimo srautą.

Vamzdelių diametras užsiduotas 28 mm, jų ilgis pamate – 12,5 m (po pusę metro atitraukiant nuo kraštų). Vėsinimas pradamas kartu su betonavimo pradžia (0 h) su 17 °C (upės temperatūros) vandens įėjimo temperatūra ir 8,33 kg/s srautu. Vėsinimas truko ne visą stebėjimo trukmę, o iki tol, kol temperatūra pasiekė aplinkos šilumos vidurkį, tai yra 10 dienų (240 h). Visą aušinimo laiką buvo palaikoma ta pati vandens temperatūra.

Norint užtikrinti, kad simuliacija teisinga, vandens išėjimo temperatūra nuo įėjimo temperatūros negali skirtis daugiau nei 4 °C. Atlikus simuliaciją ir pastebėjus, kad yra kitaip – būtina pakoreguoti tekėjimo srautą.



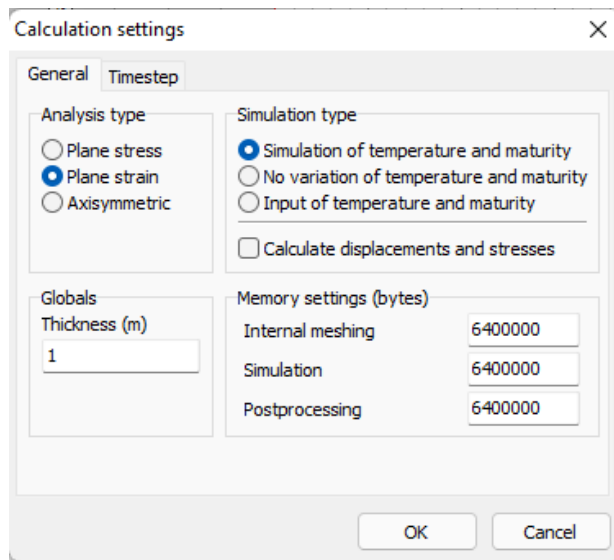
24 pav. Vamzdelių išdėstymas pamato tūryje

3.1.4.4. Temperatūriniai skaičiavimai

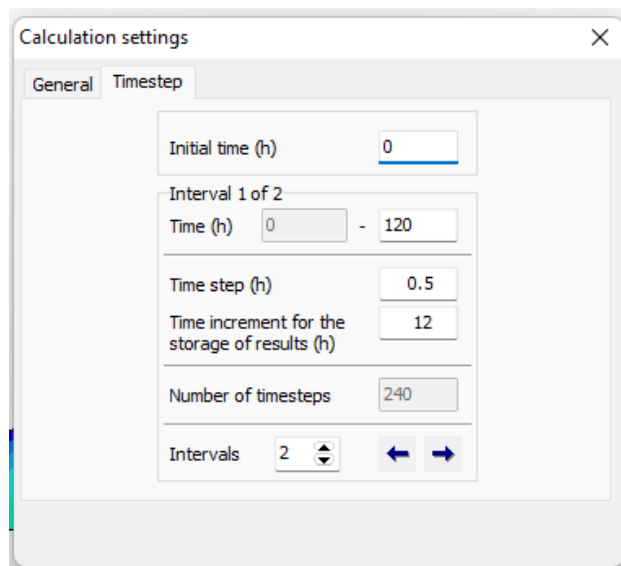
Skaičiavimas susideda iš temperatūros ir brandos simuliacijos. Pagrindiniai nustatymai, kurie buvo užsiduoti skaičiavimui, nurodyti 25-27 pav.

Norint simuliacijoje turėti gerai sugraduotą laiko žingsnį (time step), visas laiko terminas padalinamas į du intervalus. Pirmasis intervalas trunka nuo betonavimo pradžios (0 h) iki 120 h, su pusės valandos laiko žingsniu ir 12 h laiko prieaugiu, skirtu rezultatų saugojimui (Time increment for the storage of results). Šie duomenys pavaizduoti 26 pav. Antrasis intervalas: 120 h – 1080 h su vienos valandos žingsniu ir 24 h laiko prieaugiu (žr. 27 pav.).

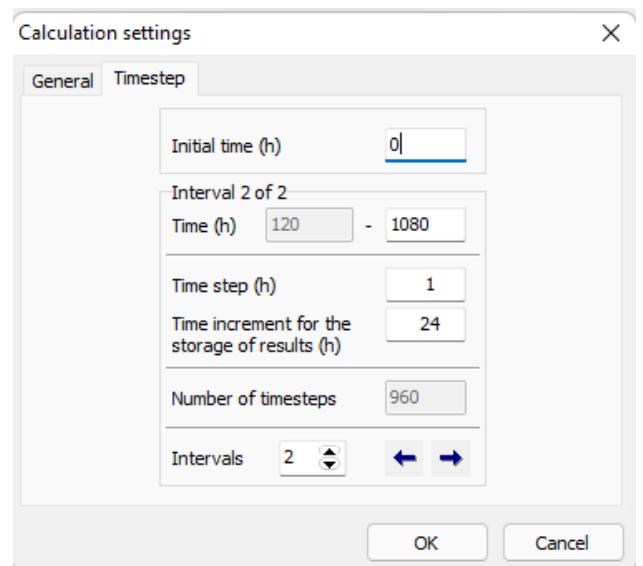
Tokie intervalai pasirinkti todėl, kad didesni temperatūros pokyčiai pastebimi kietėjimo pradžioje ir būtent todėl, kad pokyčiai būtų tinkamai užregistruoti sistemos, pirmoje stebėjimo dalyje buvo nustatytas dvigubai mažesnis žingsnis nei likusiam analizės terminui.



25 pav. Bendri duomenys simuliacijai



26 pav. Duomenys pirmam intervalui



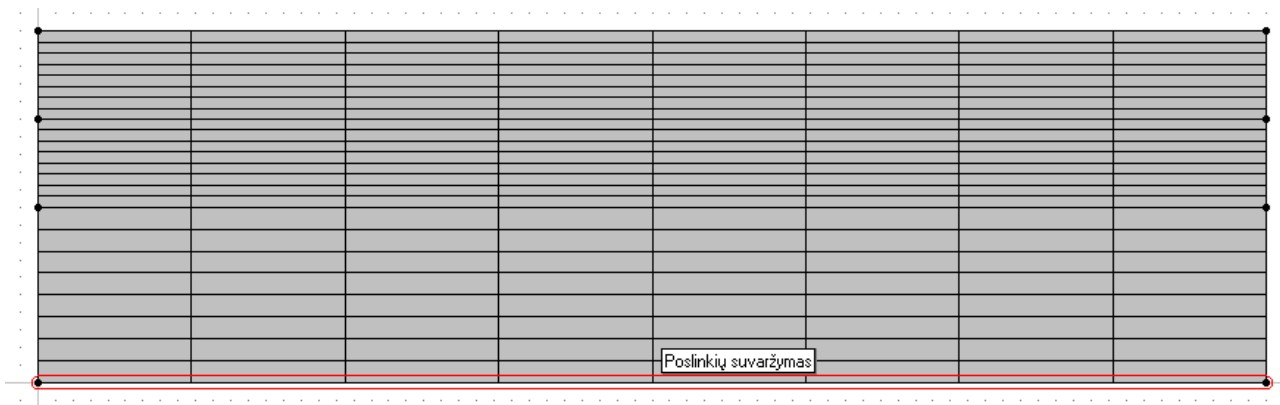
27 pav. Duomenys antram intervalui

3.1.5. Plokštumos modeliavimas

Plokštuma buvo modeliuojama tokiu pačiu principu kaip ir skerspjuvis. Vienas skirtumas būtų, kad geometrija apibrėžiama be pagrindo sluoksnio apačioje. Plokštumos išmatavimai: aukštis 4 m, plotis 13,55 m, geometrijai apibrėžti buvo naudoti 8 mazgų elementai, išskaidyti mažesnėmis dalimis su tarpiniais mazgais, tam, kad pavyktų išlaikyti tą patį eilučių skaičių kaip ir skerspjuvio geometrijoje (tai labai svarbu, nes kitu atveju programa neskaičiuoja). Taigi vėl išbraižyta keturių „aukštų“ konstrukcija.

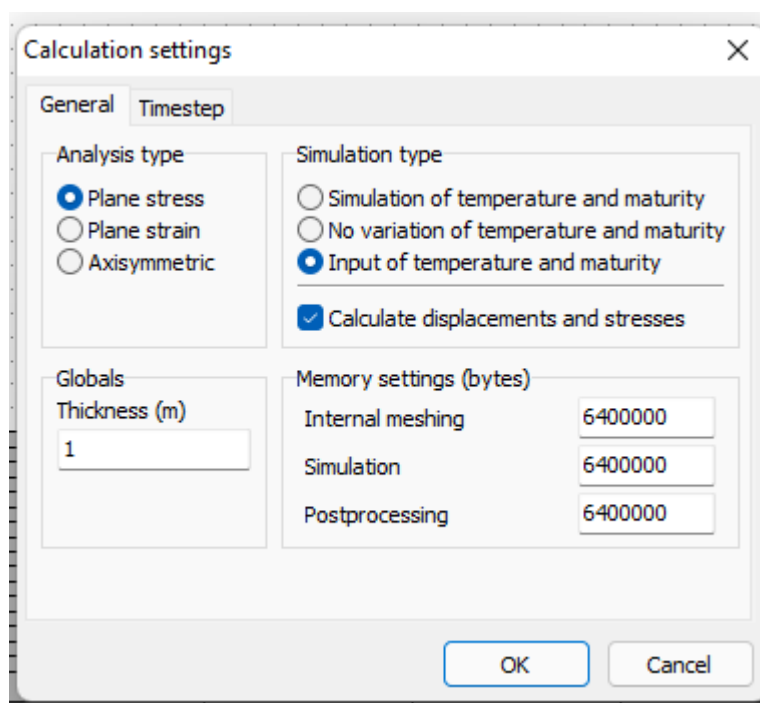
Medžiagos savybės naudojamos tokios pat, kaip 4.1.3 skyriuje, poslinkio suvaržymai taip pat užsiduoti identiški kaip ir skerspjuvyje. Duomenys, kurie susiję su temperatūra, galima importuoti iš skerspjuvio simuliacijos modelio, jų apsirašinėti atskirai nebereikia.

Plokštumos modelis gali būti naudojamas nepaisant to, ar temperatūros sumažinimui bus naudojami technologiniai vėsinimo metodai ar ne.



28 pav. Plokštumos pjūvis su poslinkio ribinėmis sąlygomis

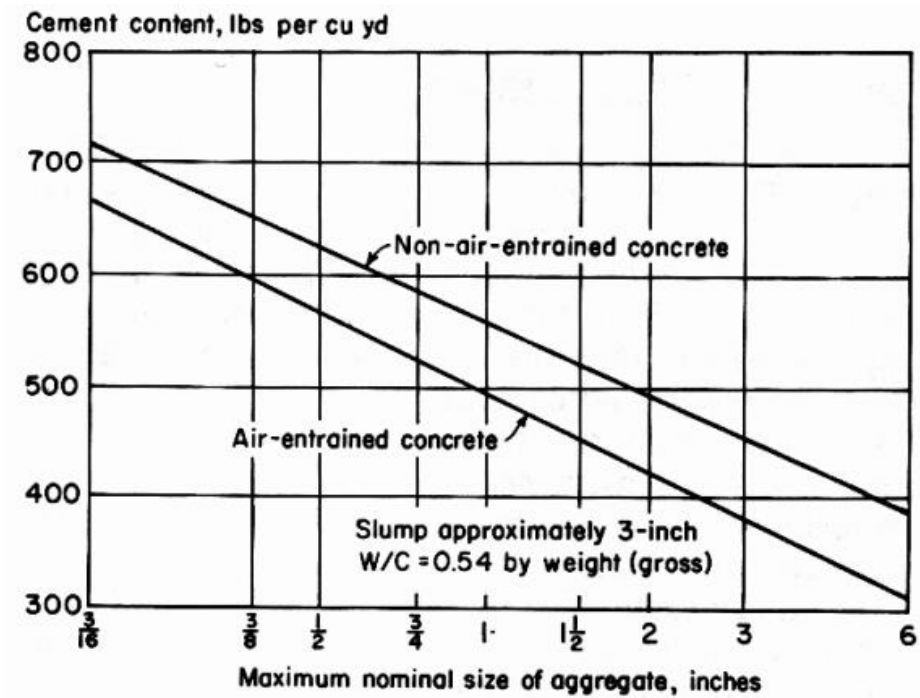
Plokštumos analizės parametruose skiriasi tik keletas nustatymų, jie nurodyti 29 pav. Laiko žingsnis ir prieaugis išlaikomi tokie pat kaip skerspjuvyje.



29 pav. Skaičiavimui užsiduodami duomenys plokštumos pjūvio simuliacijai

3.2. Stambesni užpildai

Kaip žinia, užpildų dydis sumažina cemento kiekį betone. 30 pav. parodyta cemento kiekio priklausomybė nuo maksimalaus nominalaus užpildo dydžio oro įsigėrusiam ir neįsigėrusiam betonui. Šiuo atveju priimta, kad betonas oro neprisigėręs ir padaryta prielaida, kad nominalus užpildų dydis gali būti 50 mm, o ne 25 mm. Paveikslėlyje apačioje matyti, kad 25 mm nominalaus dydžio užpildas atitinka 290 kg/m³ cemento kiekį, o 50 mm – 250 kg/m³. Todėl galima teigti, kad pastambinus užpildą, cemento kiekį betone galime sumažinti apie 14 procentų, kas šiuo atveju reikštų nuo 437,8 kg/m³ sumažėjimą iki 376,51 kg/m³. Simuliacijoje tokiu atveju pakeičiamas tik cemento kiekis, visi kiti parametrai paliekami tokie patys.



30 pav. Cemento kiekio priklausomybė nuo užpildo dydžio

3.3. Atšaldyti užpildai

Norint įsivertinti šilumos išsiskyrimą betone mažinti iš anksto atšaldytais užpildais, simuliacijoje pakanka pakeisti medžiagos savybės bei temperatūros ribines sąlygas. Temperatūra betonavimo pradžioje sumažinta iki 11 °C, o temperatūra ties klojiniais iki 9 °C (2 °C skirtumas nuo betonavimo pradžios temperatūros).

3.4. Ledas

Norint įsivertinti temperatūros mažinimą modelyje, naudojant kitą technologinį sprendimą – aušinimą ledu, taip pat pakanka skaičiavimo erdvėje pakeisti medžiagos savybės bei temperatūros ribines sąlygas. Temperatūra betonavimo pradžioje nustatyta lygi 6 °C, o temperatūra ties klojiniais – 4 °C.

4. Rezultatai

Visi rezultatai gauti HACON programos simuliacijos metu pateikiami prieduose.

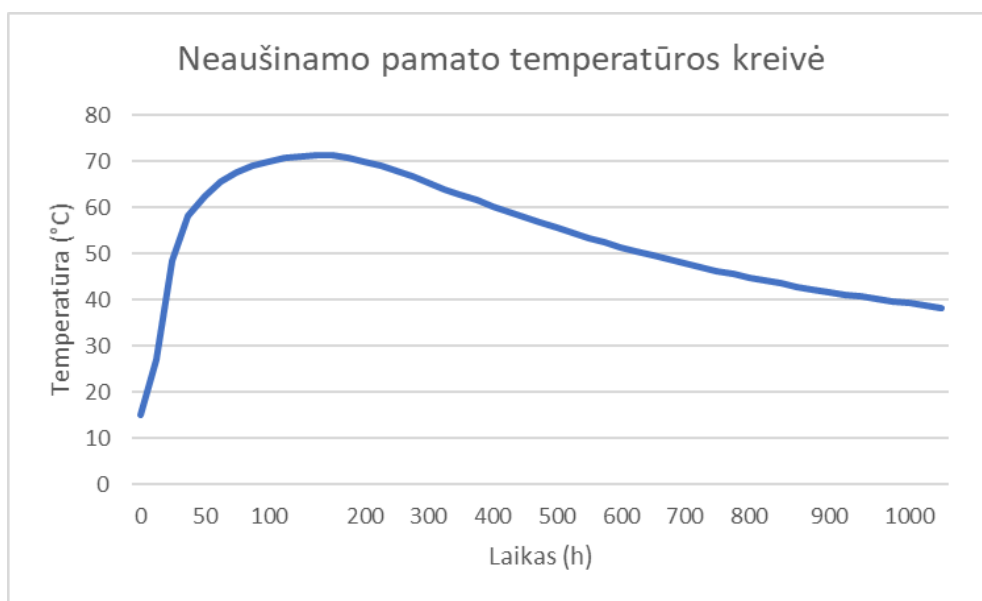
4.1. Šiluminio modeliavimo rezultatų analizė

4.1.1. Neaušinamas pamato modelis

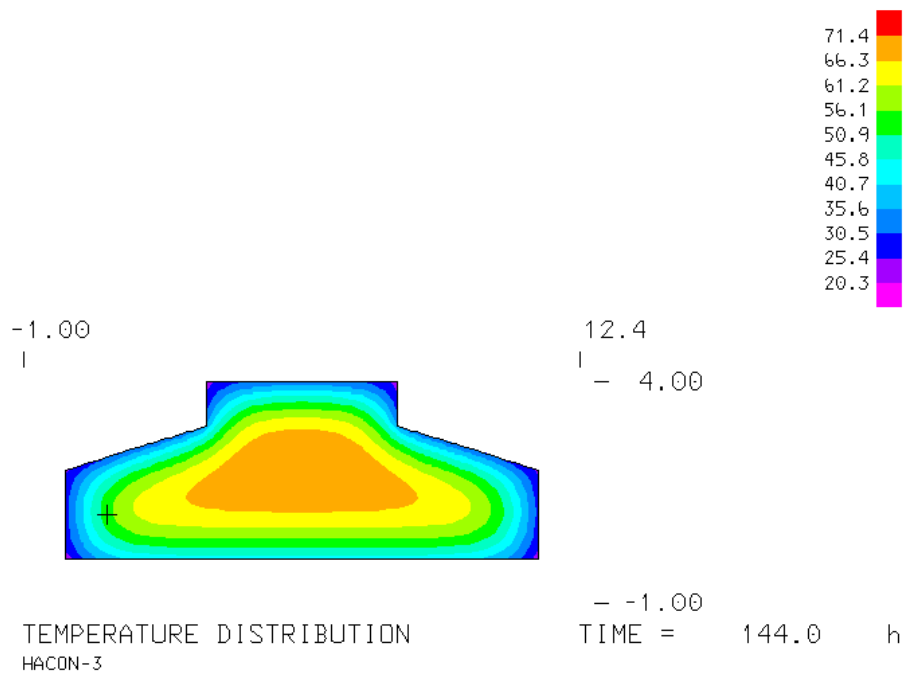
31 pav. vaizduojama maksimali temperatūros raida simuliacijos metu kai pamatas nebuvo aušinamas, o 32 pav. parodytas šio modelio temperatūros pasiskirstymas skerspjūvyje. Maksimali temperatūra pasiekta praėjus 144 valandoms po betonavimo pradžios ir buvo lygi 71,4 °C.

Iš diagramos matyti, kad net vykdant simuliaciją daugiau nei 1000 valandų (ilgiau nei pusantro mėnesio), kreivė nusistovėjimo ribos nepasiekė. Tai rodo, kad nenaudojant jokių priemonių ar technologinių sprendimų vėsinti pamatui, ne tik pakyla rizika atsirasti įtrūkimams, bet ir gerokai prailgėja darbų laikas aikštelėje.

Simuliacijos vykdyti ilgiau nei 1000 h neleido naudoto kompiuterio parametrai, tačiau stebint kreivės proporcingumą, galima būtų daryti prielaidą, kad temperatūra pamate nusistovėtų ir pasiektų vidutinę aplinkos temperatūrą maždaug ties 1350 h riba (praėjus beveik dviem mėnesiams nuo betonavimo pradžios).



31 pav. Didžiausių temperatūros reikšmių raida neaušinamo pamato atveju



32 pav. Maksimali temperatūra, gauta neaušinto modelio simuliacijoje

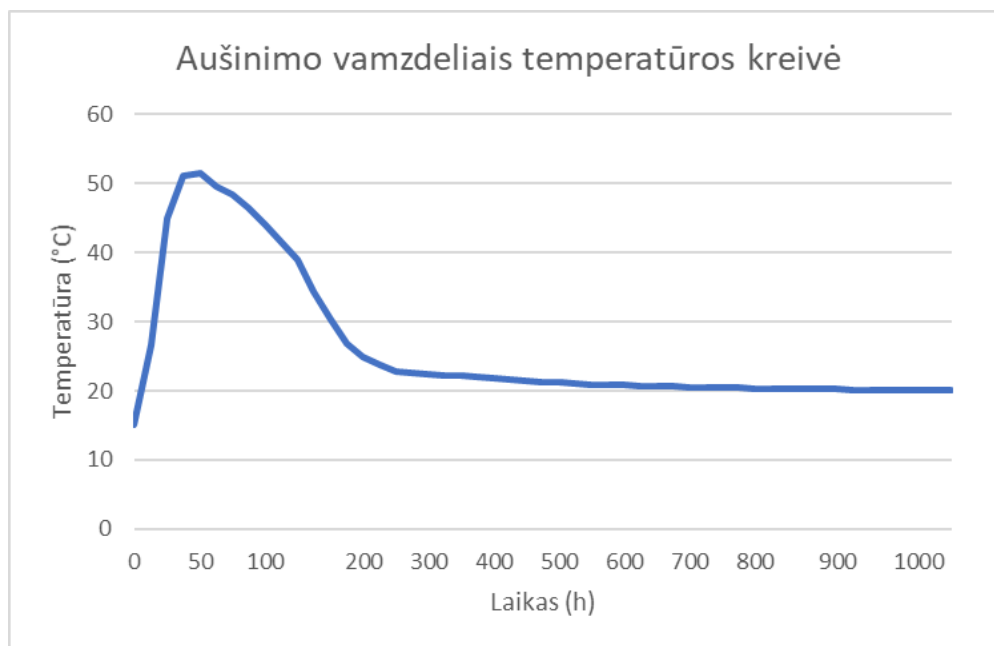
4.1.2. Pamato modelis, aušintas vamzdeliais

33 ir 34 pav. matyti pamato modelio, simuliacijoje vėsinto technologiniu būdų – upės vandeniu, temperatūros raida hidratacijos proceso metu. Maksimali temperatūra pasiekta praėjus 48 valandoms po betonavimo pradžios ir yra lygi 51,5 °C, kas yra net 28 % sumažėjimas, lyginant su referentiniu modeliu.

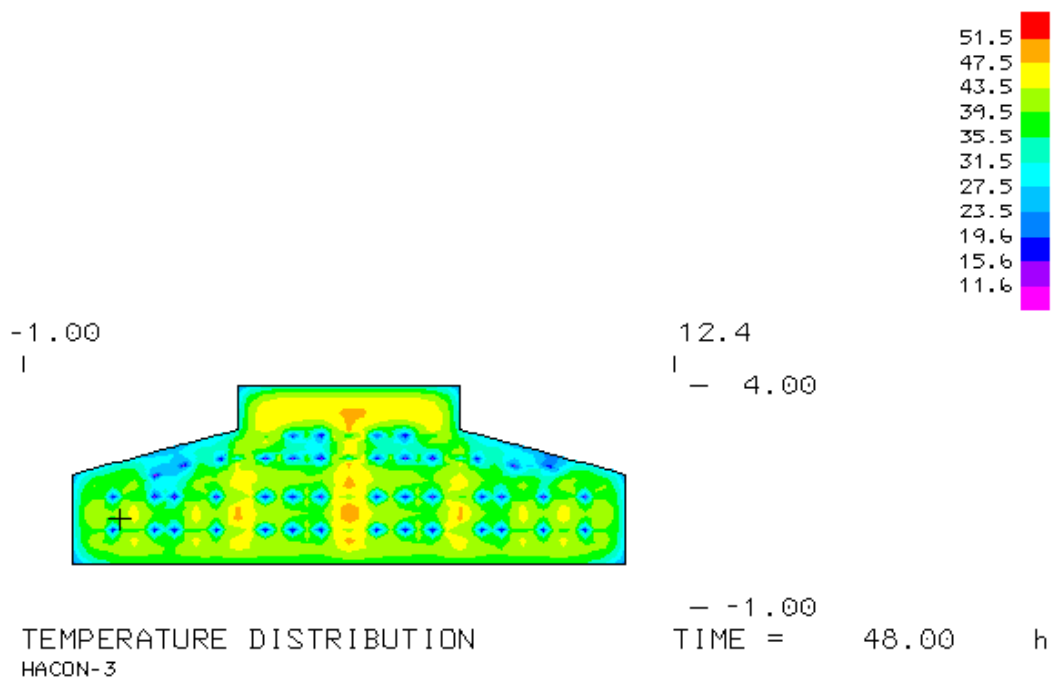
Akivaizdu, kad rezultatų kreivės forma gerokai skiriasi, lyginant su aukščiau aprašytu modeliu, temperatūros pikas pasiektas net keturiomis dienomis anksčiau. Taip pat matyti aiškūs kreivės nusistovėjimas, kas įrodo cemento hidratacijos proceso pabaigą.

Simuliacijos tikslas buvo ne tik sumažinti maksimaliai pasiektą temperatūrą kietėjimo proceso metu, bet ir per daug neperšaldyti betono (per dideli temperatūros pokyčiai gali turėti neigiamų pasekmių sukietėjusio pamato stiprumui, taip pat padidėja įtrūkių pavojus).

Programoje vamzdelių išdėstymas yra kiek ribotas, nes norint juos sudėti, pirmiausia tinklo kampuose turi būti paruošti pagalbiniai mazgai, o pasirinkus per smulkų tinklą, skaičiavimas gali neveikti. Nepaisant to, šiluminio modeliavimo metu išbandyta keletas skirtingų vamzdelių išdėstymo variacijų, kol galiausiai pasirinktas efektyviausias variantas (žr. 34 pav).



33 pav. Didžiausių temperatūros reikšmių raida aušinimo su vamzdeliais atveju



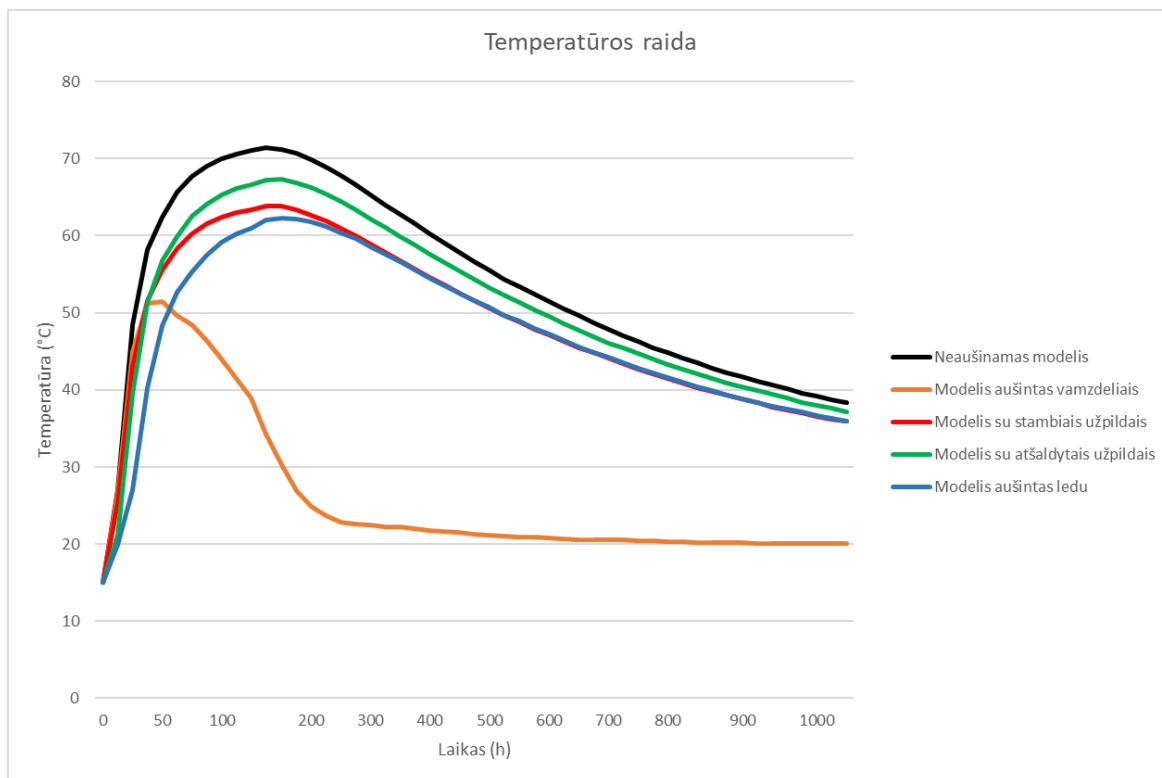
34 pav. Maksimali temperatūra, gauta simuliacijoje su aušinimo vamzdeliais

4.1.3. Skirtingų aušinimo variantų palyginimas

Į bendrą grafiką sudėjus modelių gautus rezultatus, aiškiai matyti, kad temperatūra skerspjūviuose keitėsi labai panašia proporcija visais atvejais (žr. 35 pav.). Kaip ir buvo tikėtasi atlikus literatūros analizę, iš kreivių ženkliai išsiskyrė technologiniai sprendiniai, o ypač - pamato vėsinimas vamzdelių pagalba. Temperatūra piką pasiekė anksčiausiai, nepakilo taip aukštai kaip kitais atvejais, o ir šiam pakilimui įvykus, labai greitai smuko žemyn, kol maždaug ties trylikta stebėjimo diena nusistovėjo. Puikūs rezultatai tik dar kartą įrodo, kodėl šis sprendimas vis plačiau naudojamas pasaulyje. Žinoma,

privalu paminėti, kad simuliacijoje niekaip nebuvo vertinama ar atsižvelgta į kaštus, reikalingus šiai sistemai sumontuoti pamate.

Kaip išsiskyrusios šilumos mažinimo sprendimą naudojant ledą, maksimali temperatūros vertė, lyginant su kitais modeliais buvo pasiekta vėliausiai. Taip nutiko todėl, kad betonavimo metu temperatūra buvo gerokai žemesnė. Dėl šios priežasties konstrukcijai prirėkė daugiau laiko pasiekti maksimalią šilumos vertę ir tai leido šiam metodui užsitikrinti antrąją vietą tarp efektyviausių sprendinių su 13 % mažesniu šilumos išsiskyrimu (lyginant su etaloniniu modeliu).

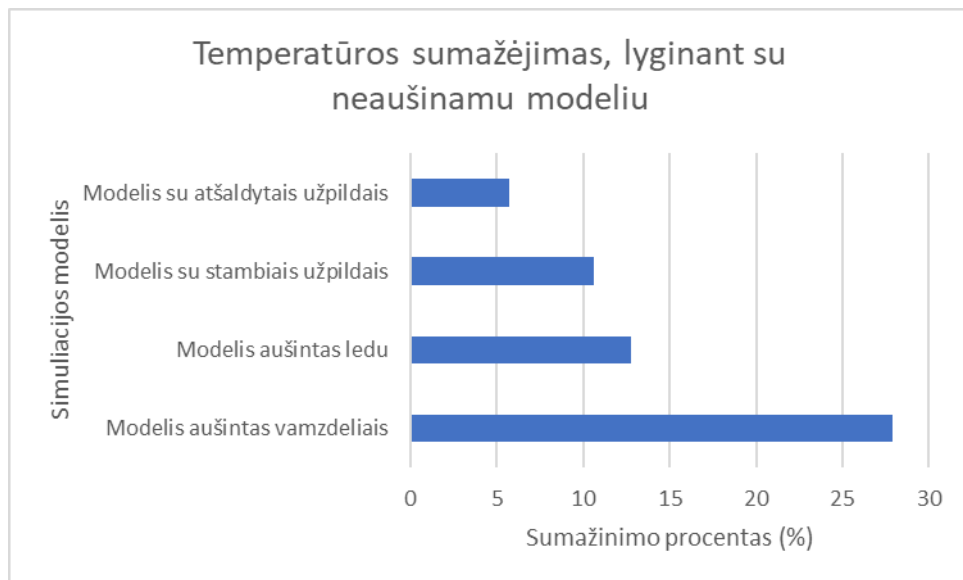


35 pav. Skirtingų modelių temperatūros raidų palyginimas

Gretinant neaušinamą modelį ir simuliaciją, kurioje naudoti stambesni užpildai, matyti, kad temperatūros skirtumai buvo mažiau žymūs - skirtumas tik 11 %. Taip pat, norint praktikoje taikyti šį variantą, reikėtų atsižvelgti ir į tai, kad naudoti stambesnius nei 50 mm užpildus yra ganėtinai sudėtinga, pagrinde dėl pačio betono pylimo proceso, nes mišinio stambumas turi didelę įtaką betono siurbimui. Jei užpildas per stambus, jis gali strigti, lipti prie armatūros ir taip paveikti betono homogeniškumą, o tai turėtų rimtų pasekmių konstrukcijos laikomajai galiai.

Prasčiausiai pasiteisinęs sprendimas visgi yra atšaldytų užpildų naudojimas. Išsiskyrusios šilumos skirtumas tik 6 %, pikas pasiektas panašiu metu kaip ir atskaitinis modelis. Visos procentinės išraiškos pavaizduotos 36 pav., skyriaus apačioje.

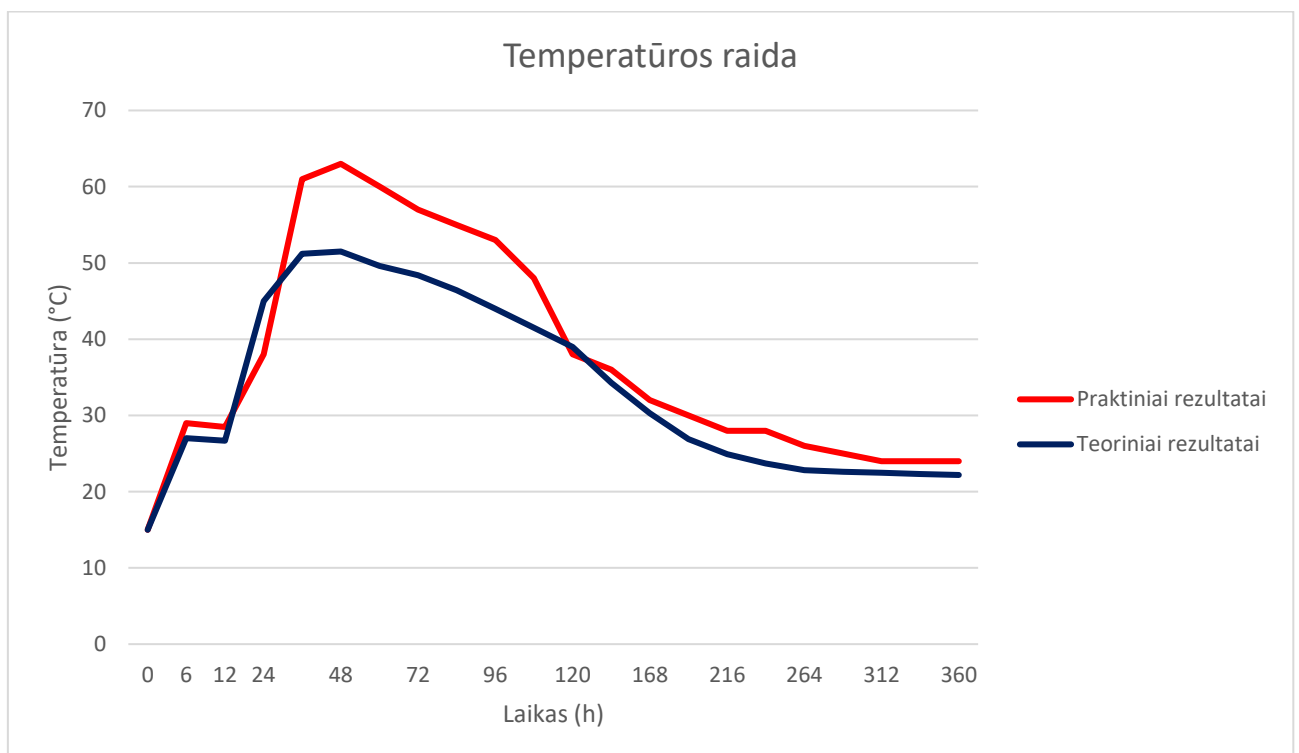
Peržvelgus visus rezultatus nesunku priėti išvadą, kad technologinis sprendimas aušinti pamatą upės vandeniu yra pats efektyviausias, jau vien dėl to, kad tai buvo vienintelis modelis, kuris simuliacijos metu (per daugiau nei 1000 h) leido šilumai, išsiskyrusiai pamato viduje nusistovėti, pasiekiant vidutinę aplinkos temperatūrą. Šiuo atveju, net ir esant didesniems sistemos įrengimo kaštams, sprendinys optimaliausias, nes projekto terminai neabejotinai yra labai suvaržyti ir darbų atlikimo trukmė yra vienas labiausiai imponuojančių faktorių.



36 pav. Procentinis maksimalios temperatūros sumažinimas, lyginant su neaušinamu modeliu

4.1.4. Teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Išsinagrinėjus teorinius rezultatus ir įsitikinus, kad optimaliausias variantas yra technologinis sprendimas pamatą vėsinti vamzdeliais, atliekamas verčių palyginimas su tilto monitoringo metu gautais praktiniais temperatūros matavimų rezultatais. 37 pav. vaizduojamos dvi kreivės, kur mėlyna linija atspindi simuliacijos metu gautus teorinius matavimus, o raudona – rezultatus, gautus realiai stebint temperatūros pokyčius pamato konstrukcijoje.



37 pav. Eksperimentinės ir teorinės temperatūros raidos palyginimas

Grafikai vizualiai panašūs, galima teigti, kad simuliacija gana artimai atvaizduoja temperatūros kitimo kreivę, atitinka tiek pirmojo hidratacijos etapo temperatūros šuolis, tiek neaktyviojo periodo trukmė. Temperatūra hidratacijos pabaigoje taip pat nusistovi per tokį pat laiką tarpą.

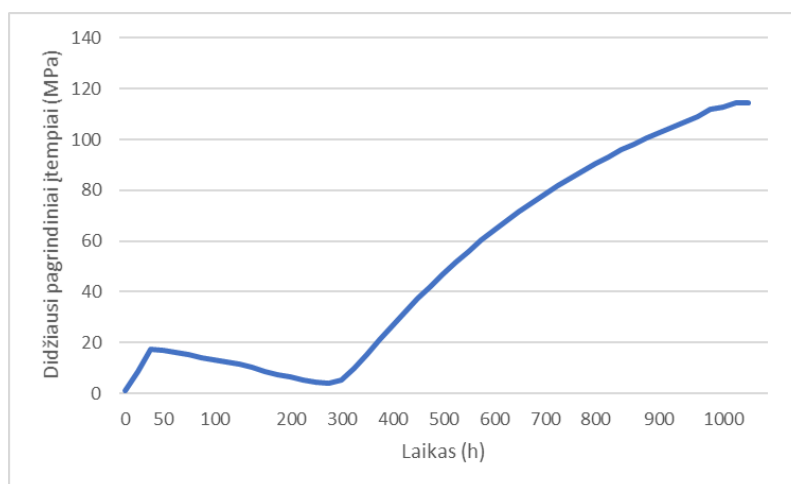
Pagrindinis ir šiuo atveju vienintelis diagramų skirtumas yra tas, kad praktiniais matavimais nustatyta, jog temperatūra pamate, cemento hidratacijos piko metu, pakilo iki 63,3 °C - kiek daugiau nei dešimčia laipsnių daugiau, lyginant su teoriniais rezultatais, kur maksimali nustatyta temperatūra lygi 51,5 °C. Tai rodo, kad HACON programos simuliacijos rodmenys nėra visiškai tikslūs ir atliekant skaičiavimus būtina įsivertinti bent 17 % atsargą. Tuo pagrindu, siekiant skaičiavimais užtikrinti realų šilumos išsiskyrimo mastą, rekomenduojama taikyti atsargos koeficientą lygų 1,7.

Praktiniai temperatūros matavimai pagrindė darbo pradžioje išsikeltą hipotezę, kad šiai masyvaus pamato konstrukcijai buvo būtina naudoti šilumos išsiskyrimą mažinančias priemones.

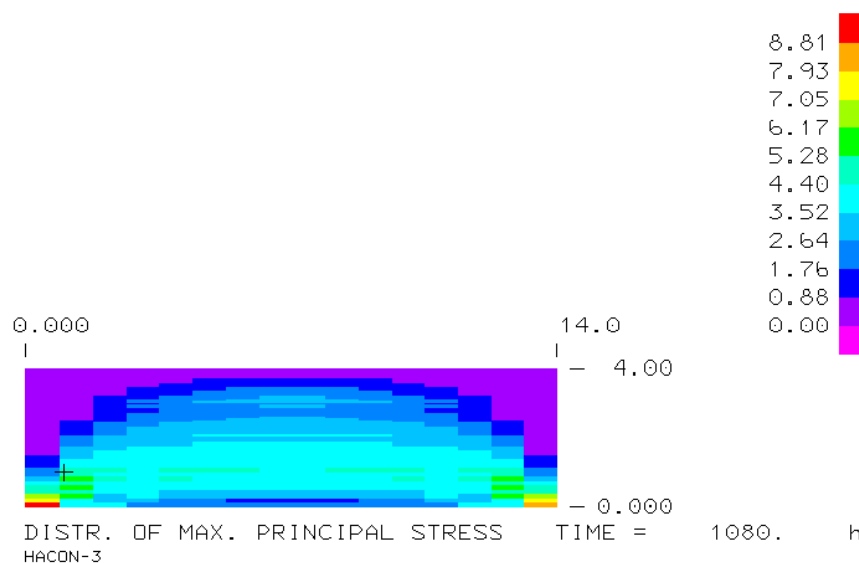
5. Įtrūkimų rizikos modeliavimas

5.1.1. Referentinis (neaušinamas) modelis

Paveikslėlyje, pažymėtame numeriu 38, matoma didžiausio pagrindinio įtempio raida plokštumos pjūvyje. Maksimalus įtempis lygus (8,81 MPa) pastebėtas simuliacijos pabaigoje. Didžiausi įtempiai konstrukcijoje aptinkami plokštumos pjūvio kampuose, apačioje, ten, kur konstrukcija buvo suvaržyta nuo judėjimo x ir y ašių kryptimis (žr. 39 pav.)



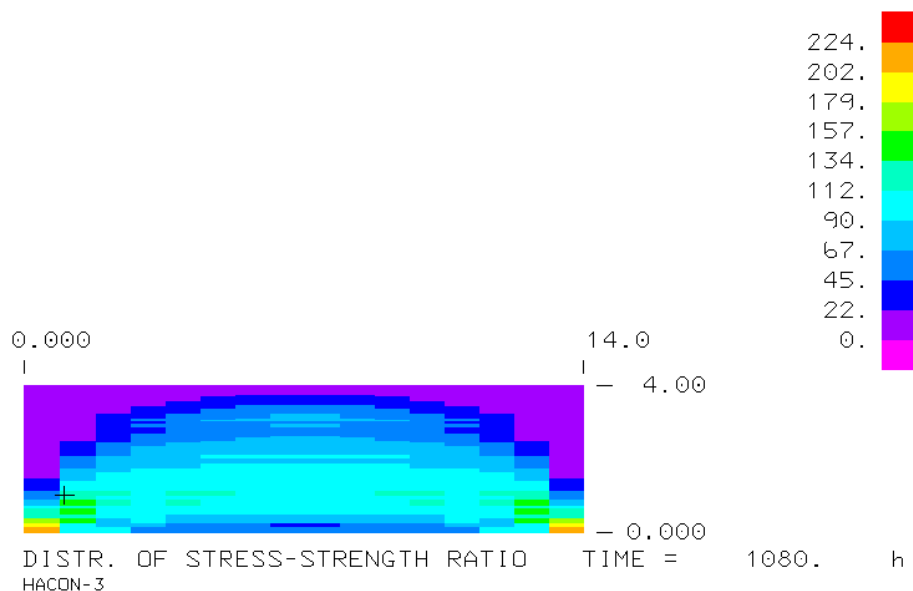
38 pav. Didžiausių pagrindinių įtempių plokštumos pjūvyje raida



39 pav. Neaušinamo modelio didžiausias pagrindinis įtempis plokštumos pjūvyje

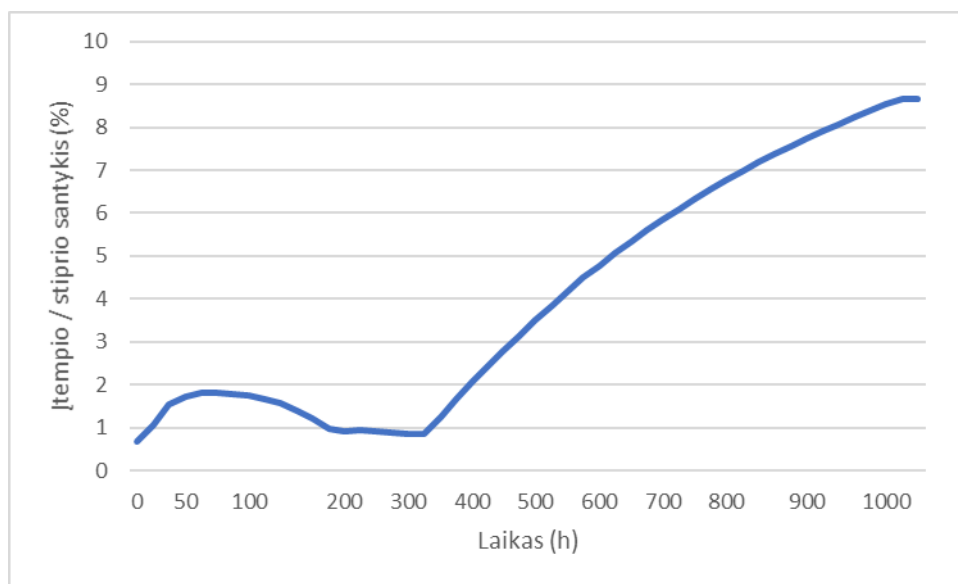
Įtrūkimų rizika vertinta pagal įtempių ir stiprio santykį, kuris, norint išvengti įtrūkimų atsiradimo, privalo būti mažesnis nei 100 % (žr. 40 pav.). Apačioje, ties konstrukcijos kraštais įtempiai gali būti nevertinami. Ši zona yra 300 mm aukščio ir neprivalo būti įtraukta į analizę, nes praktikoje yra neįmanoma pilnai užtikrinti, kad nebus visiškai jokių poslinkių, taip, kaip buvo apsirašyta simuliacijoje.

Būtent dėl to, kad poslinkiai užsiduoti lygūs nuliui, šioje zonoje kampuose gaunami didžiausi įtempimai. Atmetus suvaržytus kraštus, įtempių / stiprumo santykis būtų maždaug 50 % mažesnis, nei 40 pav. vaizduojamuose rezultatuose.



40 pav. Neauštinamo modelio įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas plokštumos pjūvyje

Neauštinamo pamato modelio atveju, didžiausia santykio vertė buvo lygi 114 %, o tai reiškia, kad konstrukcijoje galima įtrūkimų rizika. Nors vertė ir yra didesnė nei 100 %, didelė tikimybė, kad įtrūkimai atsirastų arti suvaržymo kraštų, jie gali būti nežymūs.



41 pav. Įtempių ir stiprumo santykio raida neauštinamo modelio plokštumoje

5.1.2. Palyginimas su kitais rezultatais

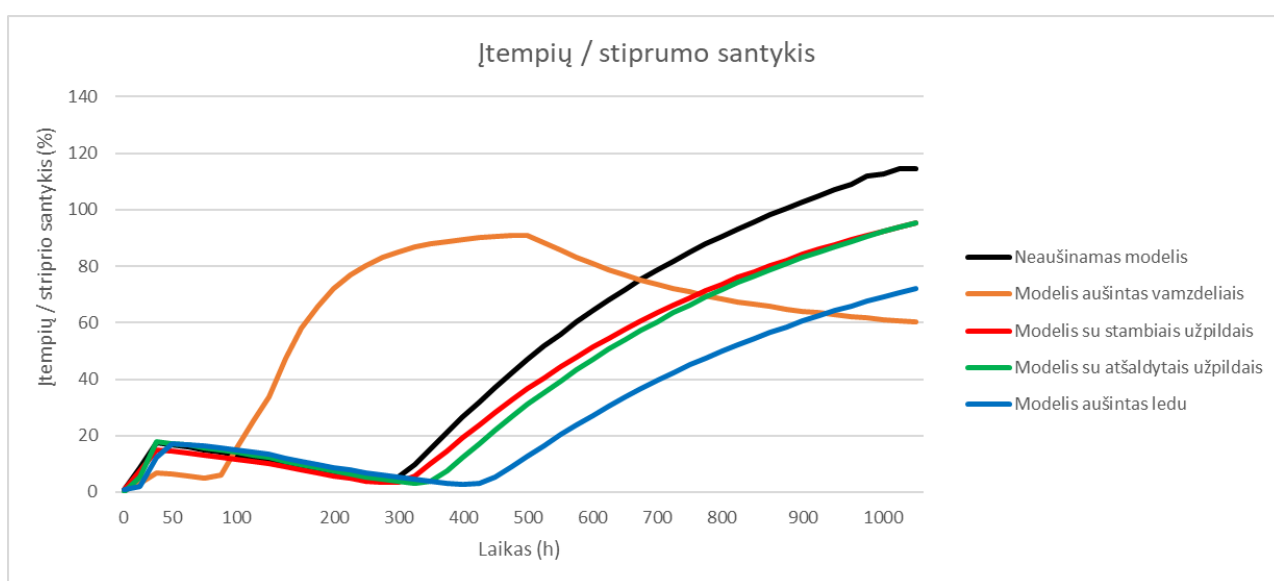
Įtrūkimų rizika vertinama atsižvelgiant į įtempių ir stiprumo santykį, todėl pagrindinis dėmesys ir duomenų analizė atliekama būtent šioms grafoms, ne didžiausio pagrindinio įtempio rezultatams.

Stebint rezultatų kreives (žr. 42 pav.) matyti, kad beveik visų variantų raida yra proporcinga. Atvejis, kuris ir vėl išsiskiria – aušinimo vamzdeliais modelis. Matyti, kad šio atvejo simuliacijos metu, santykis sukilo greičiausiai ir (sąlyginai) mažiausiai (iki 90,9 %). Toks rezultatas suteikia pagrindo manyti, kad įtrūkimo rizikos šiuo atveju nėra, arba ji yra labai maža. Užsiminta, kad rezultatas tik

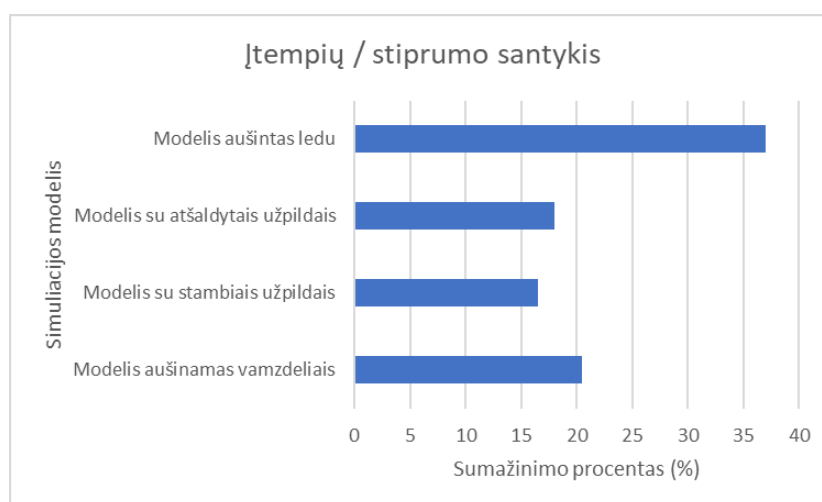
sąlyginai mažiausias, nes iš grafos matyti, kad kito technologinio aušinimo būdo – vėsavimo ledu, atveju santykis yra dar mažesnis (tik 72,07 %), tačiau, simuliacijai pasibaigus dar nematyti kreivės nusistovėjimas, todėl daroma prielaida, kad ji dar galėjo kilti tolimesnėje eigoje, jei skaičiavimas būtų tęstas toliau. Abu atvejai, kur modelis aušintas užpildais, pasiekė praktiškai vienodą rezultatą – 83 %, su nežymiu skirtumu antroje vertėje po kabelio. Nepaisant to, visi šie simuliacijų variantai laikomi sėkmingais, nes kiekvieno iš jų atveju nebuvo viršyta 100 % riba, įtrūkimų rizikos išvengta.

Rezultatus lyginant su referentiniu modeliu tiesiogiai (žr. 43 pav.), teoriškai būtų galima teigti, kad šį kartą efektyviausias buvo aušinimo ledu modelis, tačiau reikia nepamiršti fakto, kad simuliacijai pasibaigus kreivė dar nebuvo sustojusi kilti, todėl galimai vertė būtų pakilusi aukščiau nei aušinimo vamzdeliais atveju.

Atsižvelgus į tai ir visiškai kitokią kreivės raidą, pasilieku prie nuomonės, kad efektyviausiu sprendiniu laikomas konstrukcijos aušinimas vamzdeliais.



42 pav. Įtempių ir stiprumo santykio raida skirtingais atvejais



43 pav. Įtempių / stiprumo santykio palyginimas, sumažinimo procento atžvilgiu, lyginant rezultatus su referentiniu modeliu

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę, nustatyta, kad nėra tikslaus apibūdinimo ir nėra patikimos metodikos apibrėžiančios masyvios betoninės konstrukcijos sąvoką. Tačiau mokslininkai ir inžinieriai pripažįsta, kad projektuojant atomines elektrines ir hidroelektrines, užtvankas, didelių gabaritų pamatus, tilto atramas, masyvias sienas, dangoraižius, bangolaužius ir t.t reikia atlikti išankstinį temperatūros modeliavimą ir numatyti prevencines priemones staigiam temperatūros kilimui konstrukcijos viduje cemento hidratacijos metu.
2. Išanalizavus teorinius rezultatus nustatyta, kad aušinimas vamzdžiais yra pats tinkamiausias sprendimas tiriamos konstrukcijos naudojimui. Efektyviausiai ir greičiausiai sumažinama temperatūra pamate, patikimiausiai sumažinama įtrūkimo rizika. Vienintelis sistemos minusas – įrengti tokią sistemą, lyginant su kitais aušinimo būdais, yra sąlyginai brangu.
3. Buvo atliktas automobilinio tilto monitoringas, jo eigoje stebėtos konstrukcijos prieš betonavimą, betonavimo darbai bei temperatūros išsiskyrimas. Vandens srautas reguliuotas atsižvelgiant į pratekančio vandens ir betono temperatūrą, į aušinimo sistemą buvo paduodamas ne mažesniu nei 0,3 l/s debitu kiekvienam vamzdžiui. Vėsinimą buvo galima nutraukti tik pamato temperatūrai sumažėjus iki paros oro vidutinės temperatūros.
4. Šiluminio modeliavimo būdu buvo išanalizuoti skirtingi masyvios konstrukcijos aušinimo metodai. Analizavimui buvo pasirinkti šie: aušinimas, naudojant stambesnę užpildą, taip sumažinant cemento kiekį betone; iš anksto atvėsintų užpildų naudojimas, taip sumažinant pradinę temperatūrą betone; technologinis aušinimas ledu – taip pat sumažinant pradinę temperatūrą konstrukcijoje (iki dar žemesnės ribos) bei aušinimas vamzdžiais, per juos leidžiant upės vandenį – priimta išvada, kad šis metodas pasiteisino labiausiai.
5. Šiluminio modeliavimo būdu buvo nustatyta įtrūkimų rizikos galimybė. Išanalizavus rezultatus matyti, kad beveik visų variantų atveju, įtrūkimų kreivės raida yra proporcinga. Atvejis, kuris gerokai išsiskyrė – aušinimo vamzdžiais modelis. Matyti, kad šio atvejo simuliacijos metu santykis sukilo greičiausiai ir (sąlyginai) mažiausiai (iki 90,9 %). Toks rezultatas suteikia pagrindą manyti, kad įtrūkimo rizikos šiuo atveju nėra, arba ji yra labai maža.
6. Atlikus automobilinio tilto monitoringą matyti, kad praktiniai rezultatai yra proporcingi teoriniams, kurie buvo gauti atlikus skaitinę simuliaciją programa HACON 3. Tiesa, nebuvo apsieita be šiokių tokių neatitikimų - praktiniais matavimais nustatyta, jog temperatūra pamate, cemento hidratacijos piko metu, pakilo iki 63,3 °C, kiek daugiau nei dešimčia laipsnių, lyginant su teoriniais rezultatais, kur maksimali nustatyta temperatūra lygi 51,5 °C. Tai rodo, kad HACON programos simuliacijos rodmenys nėra visiškai tikslūs ir atliekant skaičiavimus būtina įsivertinti bent 17 % atsargą. Tuo pagrindu, siekiant skaičiavimais užtikrinti realų šilumos išsiskyrimo mastą, rekomenduojama taikyti atsargos koeficientą lygų 1,7.

Literatūros sąrašas

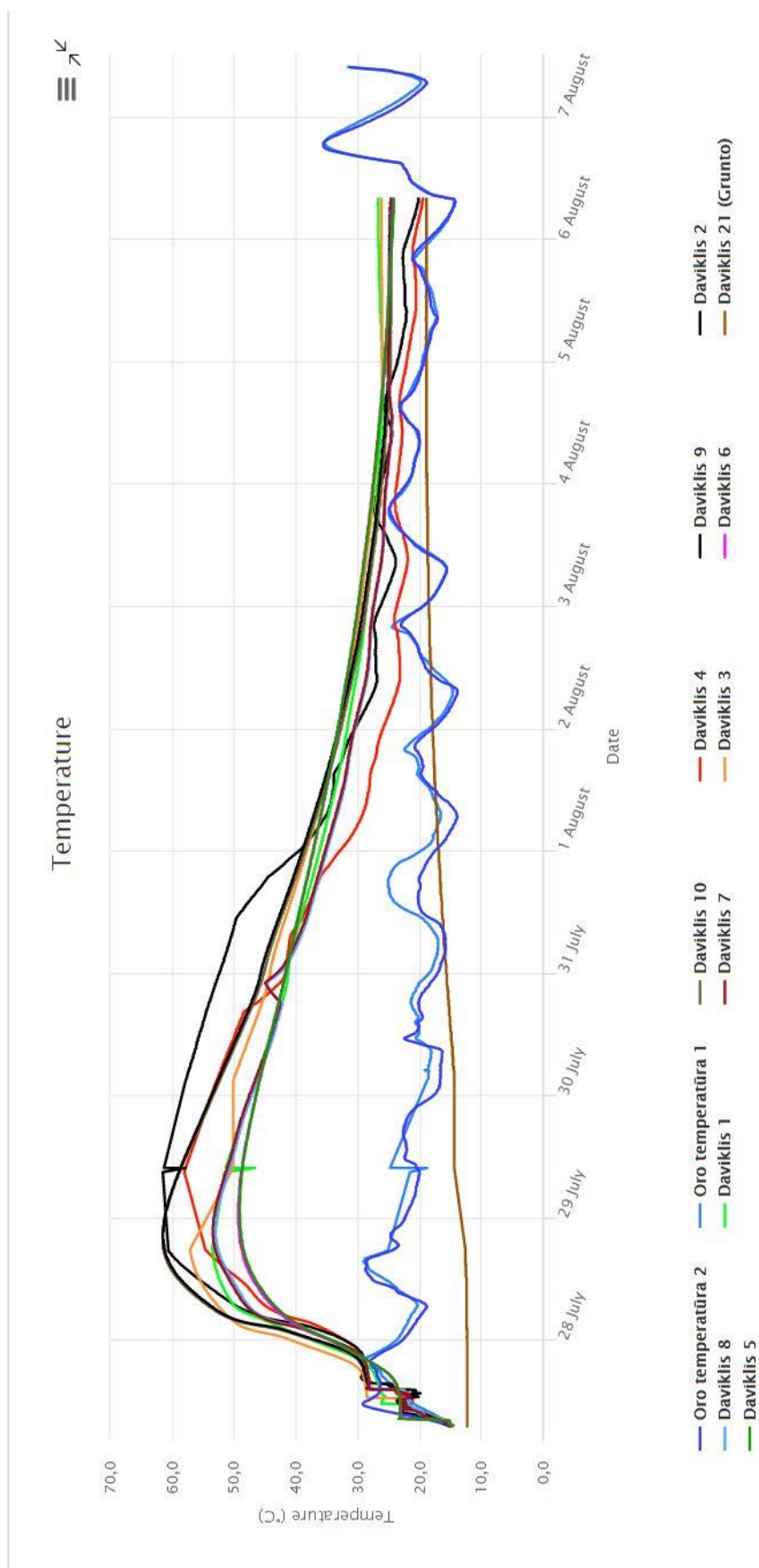
1. Betioli, I., Sá, S. N., & Fiorini, A. S. (1997). Criteria for control and survey of the cracking of the buttress dam of Itaipu. In XXII Simpósio Nacional de Grandes Barragens, CBDB (Brazilian Committee on Dams) São Paulo, in Portuguese.
2. Rosso, J. A., & Piasentin, C. (1997). Studies on the cracking of the buttress dam of Itaipu. In XXII Simpósio Nacional de Grandes Barragens, CBDB (Brazilian Committee on Dams) São Paulo, in Portuguese.
3. Funahashi, E. I. Jr., & Kuperman, S. C. (2010). Study of thermal cracking in the spillway of a small hydropower plant. In VII Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, CBDB (Brazilian Committee on Dams), São Paulo, in Portuguese.
4. ACI Committee 207. 207.1R-05 Guide to Mass Concrete, American Concrete Institute. 2005. Farmington Hills, Mich.
5. Ulm, F.J., Coussy, O., (2001). What is a “Massive” Concrete Structure At Early Ages? Some Dimensional Arguments. *Journal of engineering mechanics*, 127(5). Abstract only. Available through: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)07339399\(2001\)127:5\(512\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)07339399(2001)127:5(512))> [Žiūrėta: 2021-02-21].
6. M. Batog, Z. Giergiczny, “Impact of mass concrete constituents on its properties”, *Construction & Building Materials* 146:221-230, 2017
7. Kim, S.G., (2010). Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement. Master of Science Iowa State University. Available at: < <http://lib.dr.iastate.edu/etd/11675/>> [Žiūrėta: 2021-02-21].
8. Meinhard, K.; Lackner, R. Multi-phase Hydration Model for Prediction of Hydrationheat Release of Blended Cements. *Cement and Concrete Research*. ISSN 0008-8846. 2008, vol. 38, no. 6. p. 794–802.
9. Kodur VKR, Bhatt PP, Soroushian P, et al. Temperature and stress development in ultra-high performance concrete during curing. *Constr Build Mater*. 2016;122:63–71.
10. Ge, Z., (2005). Predicting temperature and strength development of the field concrete. Ph.D. IOWA.State.University.Available.at.<http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2729&context=rtd>> [Žiūrėta: 2021-02-21].
11. Kim, K. H., Jeon, S. E., Kim, J. K., & Yang, S. (2003). An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(3), 363–371.
12. Bentz, D. (2008). A review of early-age properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 196–204.
13. Abdolhosseini Qomi, M. J., Ulm, F.-J., & Pellenq, R. J.-M. (2015). Physical origins of thermal properties of cement paste. *Physical Review Applied*, 3, 064010.
14. Bentz, D. (2007). Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement pastes. *Materials and Structures*, 40, 1073–1080.
15. Bentz, D., Peltz, M., Duran-Herrera, A., Valdez, P., & Juarez, C. (2011). Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Building Physics*, 34(3), 263–275.
16. Bjøntegaard, Ø., & Sellevold, E. J. (2001). Interaction between thermal dilation and autogenous deformation in high performance concrete. *Materials and Structures*, 34, 266–272.
17. Yeon, J. H., Choi, S., & Won, M. C. (2013). In situ measurement of coefficient of thermal expansion in hardening concrete and its effect on thermal stress development. *Construction and Building Materials*, 38, 306–315.
18. Kada, H., Lachemi, M., Petrov, N., Bonneau, O., & Aitcin, P. C. (2002). Determination of the coefficient of thermal expansion of high performance concrete from initial setting. *Materials and Structures*, 35, 35–41.

19. Cook, W. D., Aitcin, P. C., & Mitchell, D. (1993). Thermal stresses in large high-strength concrete columns. *ACI Materials Journal*, 89(1), 61–68.
20. Naik, T. R., Kraus, R. N., & Kumar, R. (2010). Influence of types of coarse aggregates on the coefficient of thermal expansion of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4), 467–472.
21. Casanova, E., (1980). Concrete cooling on dam construction for world's largest hydroelectric power station. *International Journal of Refrigeration*. Volume 3 (1). Available through: Science Direct website < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0140700780900699>> [Žiūrėta: 2021-02-21].
22. E. M. R. Fairbairn, M. Azenha. *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures*. State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS. RILEM 2019, ISBN 978-3-319-76617-1
23. American Concrete Institute ACI. (2016). 301–16 Specifications for Structural Concrete. ACI Committee 301. ISBN: 9781942727866.
24. JSCE. (2010). Guidelines for concrete N. 16. Standard specifications for concrete structures 2007—Materials and construction. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers.
25. FDOT. (2010). Standard specifications for road and bridge construction. Tallahassee, FL: Florida Department of Transportation.
26. Japanese Concrete Institute JCI. (2012). Guidelines for control of cracking of mass concrete, 2012 (English version translated from the Japanese Version of 2008).
27. Bamforth, P. (2007). CIRIA C660: Early-age thermal crack control in concrete. London: CIRIA (Construction Industry Research and Information Association). ISBN: 978-0-86017-660-2.
28. QCS. (2014). Qatar construction specifications. Qatar: Ministry of Environment.
29. Atiş, C. D., (2002), Heat evolution of high-volume fly ash concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 5, Issue 5, Pages 751-756. [online] Available at: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601007554>> [Žiūrėta: 2021-02-21].
30. Langan, B.W., Weng, K. and Ward, M.A., (2002). Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Vol.32(7), pp.1045-1051. Available at: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884602007421>> [Žiūrėta: 2021-02-21].
31. Lewis, R., Sear, L., Wainwright P., and Ryle, R., n.d., Cementitious additions. In J. Newman and B. S. Choo, ed. 2003. *Advanced concrete technology*. ch. 3.
32. Schackow, A., Effting, C., Gomes, I. R., Patruni, I.Z., Vicenzi, F., and Kramel, C., (2016), Temperature variation in concrete samples due to cement hydration, *Applied thermal engineering*, Volume 103, Pages 1362-1369. [online] Available at: <http://www.sciencedirect.com/>> [Žiūrėta: 2021-02-21]
33. Takeuchi, H., Tsuji, Y., and Nanni, A., 1993. Concrete Precooling Method by Means of Dry Ice. *Concrete International: Design & Construction*. pp.52-56.
34. Yong-xing Hong, Wen Chen, Ji Lin, Claws Gong, and Hong-da Cheng, “Thermal field in water pipe cooling concrete hydrostructures simulated with singular boundary method,” *Water Sci. Eng.*, 10(2), 107 – 114 (2017).
35. Qiang, S., Xie, Z-q. and Zhong, R., (2015), A p-version embedded model for simulation of concrete temperature fields with cooling pipes, *Water Science and Engineering*, Volume 8 (3), Pages 248-256, Available at: Science Direct website <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237015000551> [Žiūrėta: 2021-02-21]
36. Charpin, J., Myers, T., Fitt, A.D., Fowkes, N., Ballim, Y., and Patini, A.P., (2004). Piped water cooling of concrete dams, [online] Available at: <http://www.maths-inindustry.org/miis/62/1/Pipewat.pdf>

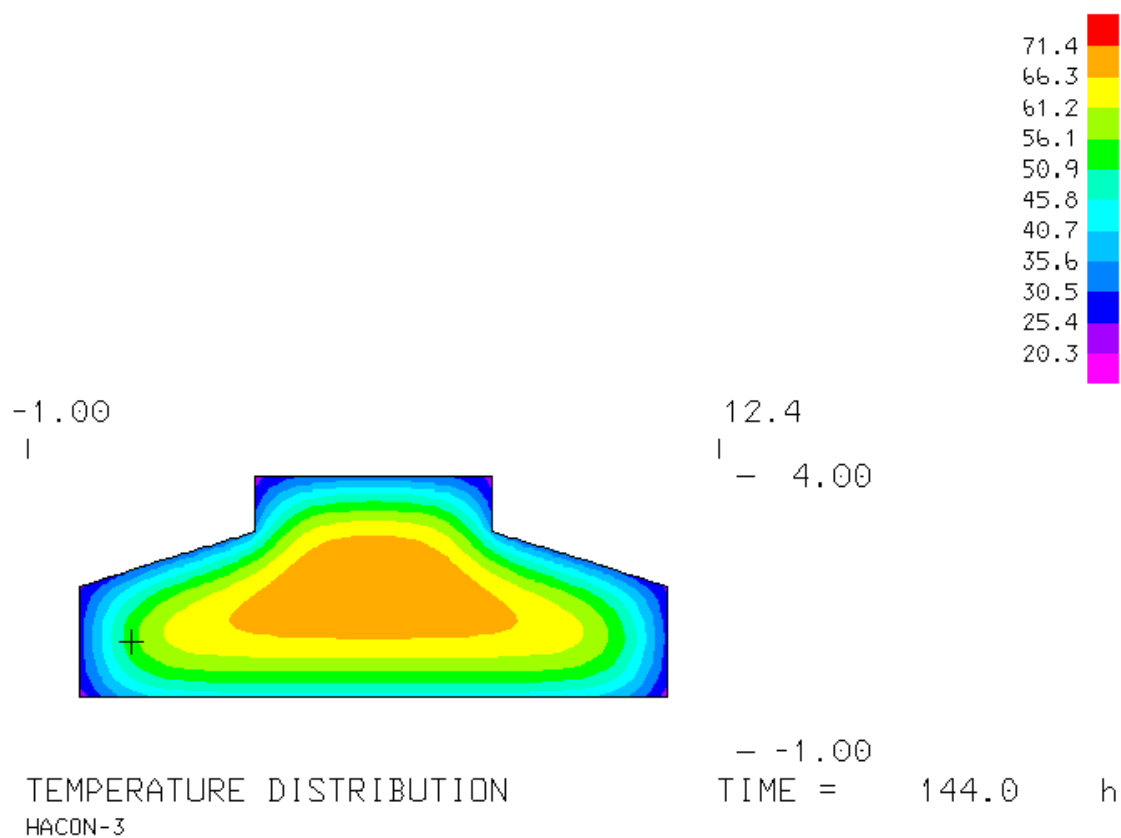
37. Qian C., Gao G. (2012), Reduction of interior temperature of mass concrete using suspension of phase change materials as cooling fluid, *Construction and Building Materials*, Volume 26, Issue 1, Pages 527-531 [online] Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181100316> [Žiūrėta: 2021-02-21]
38. Hedlund, H., and Groth, P., (1997). Air cooling of concrete by means of embedded cooling pipes- Part I: Laboratory tests of heat transfer coefficients. *Materials and Structures/ Matériaux et Constructions*, Vol 31, pp 329-334. Accepted 26 March 1997, Published 31 June 1998. Available at: < <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02480675>> [Žiūrėta: 2021-02-21]
39. Ha J. H., Youn su Jung *, Yun-gu Cho. Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system. *Automation in Construction* 45 (2014) 16–24.
40. Sandra Lagundžija, Marie Thiam. Temperature reduction during concrete hydration in massive structures. TRITA-BKN. Master Thesis 514, 2017. ISSN 1103-4297.
41. N. A. Aniskin1 and Nguyen Trong Chuc. TEMPERATURE REGIME AND THERMAL STRESS IN A CONCRETE MASSIF WITH PIPE COOLING. *Power Technology and Engineering*, Vol. 52, No. 6, March, 2019. DOI 10.1007/s10749-019-01009-9
42. Bamforth, P. (2007). CIRIA C660: Early-age thermal crack control in concrete. London: CIRIA (Construction Industry Research and Information Association). ISBN: 978-0-86017-660-2.
43. ICOLD. (1990). Bulletin n°76, conventional methods in dam construction. International Commission on Large Dams.
44. Yang, J., Hu, Y., Zuo, Z., Jin, F., & Li, Q. (2012). Thermal analysis of mass concrete embedded with double-layer staggered heterogeneous cooling water pipes. *Applied Thermal Engineering*, 35, 145–156, 3.
45. Springenschmid, R. Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. RILEM Technical Committee 119, London: E and FN Spon, 1998.
46. Riding, K. "Early age concrete thermal stress measurement and modeling." Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, Texas, 2007.
47. Bobko, C P, R Seracino, P Zia, and A Edwards. "Crack Free Mass Concrete Footings on Bridges in Coastal Environments." Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering, North Carolina State University, 2012.
48. Tia, M, C Ferraro, A Lawrance, S Smith, and E Ochiai. Development of Design Parameters for Mass Concrete Using Finite Element Analysis. Tallahassee, FL: Florida Department of Transportation, 2010.
49. Lee, M H, B S Khil, and H D Yun. "Influence of Cement Type on Heat of Hydration and Temperature Rise of the Mass Concrete." *Indian Journal of Engineering & Material Sciences* 21 (2014): 536-542.
50. N. A. Aniskin1 and Nguyen Trong Chuc. TEMPERATURE REGIME AND THERMAL STRESS IN A CONCRETE MASSIF WITH PIPE COOLING. *Power Technology and Engineering*, Vol. 52, No. 6, March, 2019. DOI 10.1007/s10749-019-01009-9
51. Wu, S, D Huang, F B Lin, H Zhao, and P Wang. ""Estimation of cracking risk of concrete at early age based on thermal stress analysis." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 105 (2011): 171-186.
52. Lin, Y. Thermal Stress Analysis for Early Age Mass Concrete Members. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. 2015. Available at: <<https://researchrepository.wvu.edu/etd/6090>> [Žiūrėta: 2021-03-21]
53. Nguyena,T., T., Waldmanna, D., Buib, T. Q. Computational chemo-thermo-mechanical coupling phase-field model for complex fracture induced by early-age shrinkage and hydration heat in cement-based materials. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 348 (2019) 1–28.

Priedai

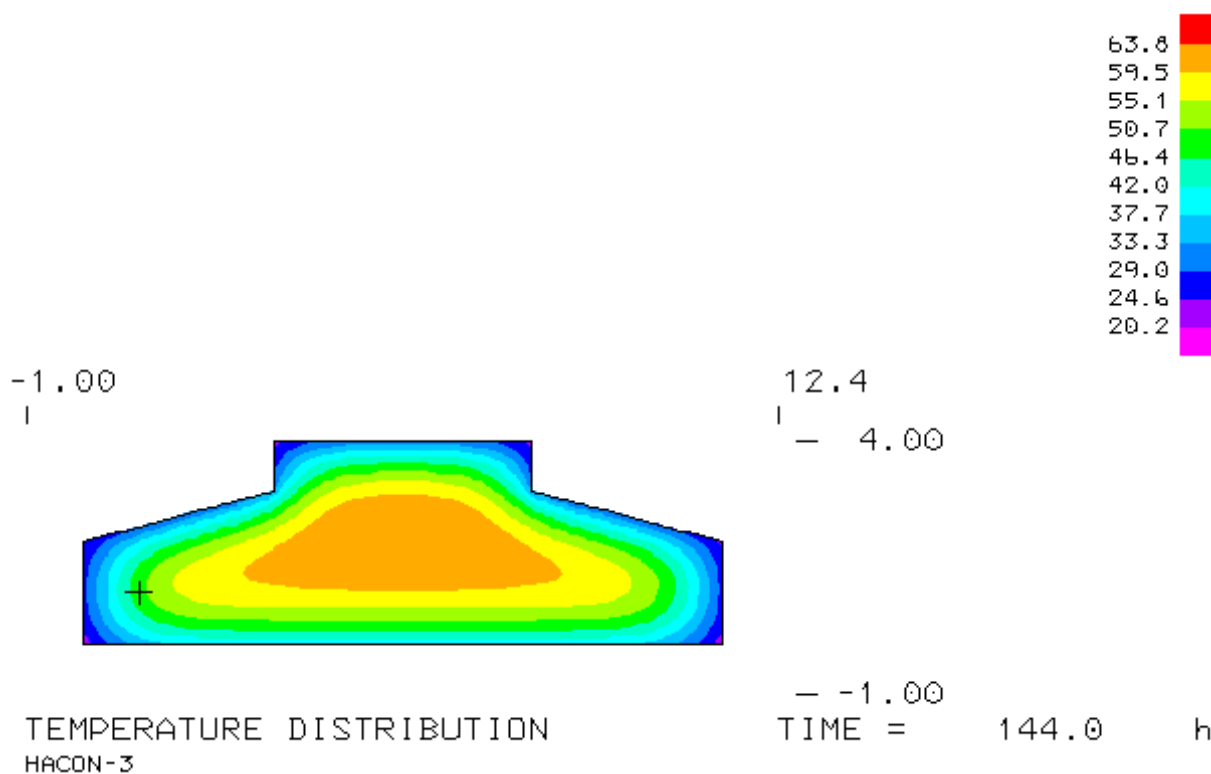
1. Priedas. Eksperimentinių temperatūrinių matavimų rezultatų grafikas



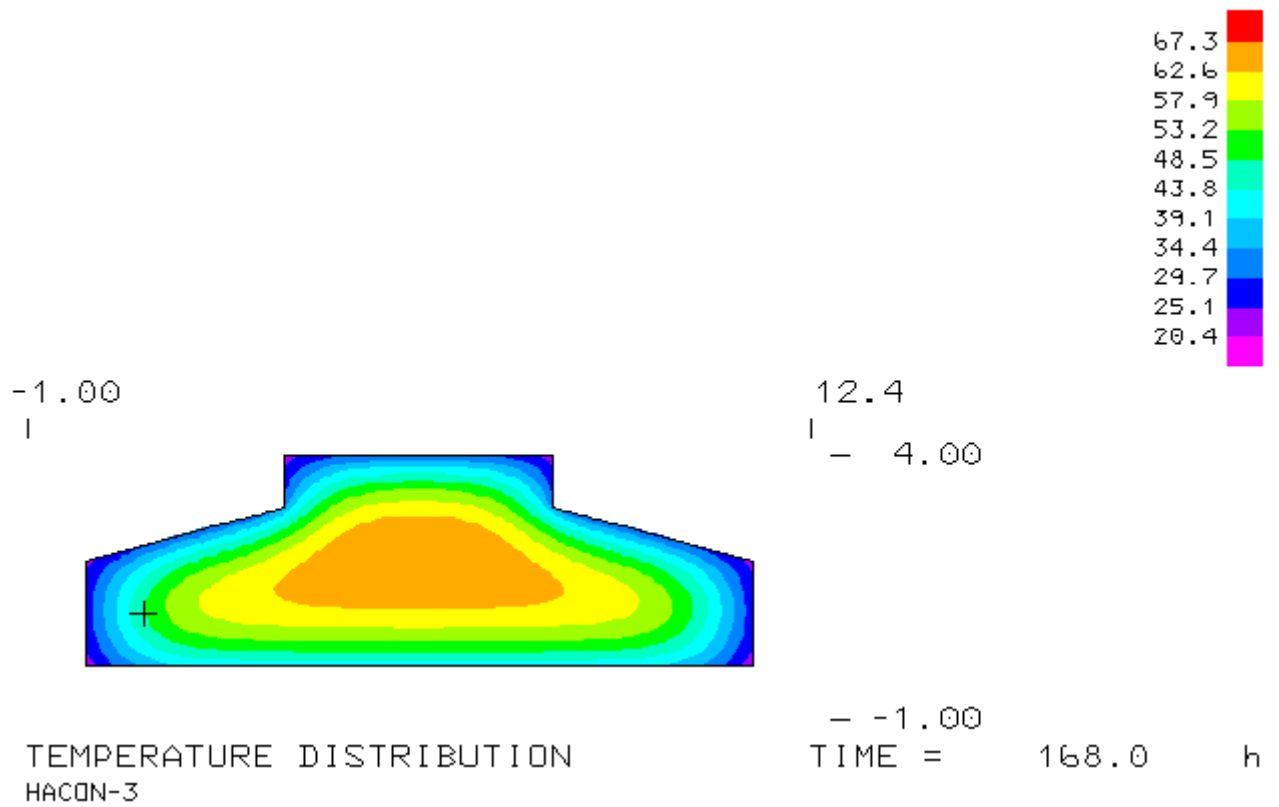
2. Priedas. Temperatūros pasiskirstymo rezultatai, gauti skirtingų HACON 3 simuliacijų metu



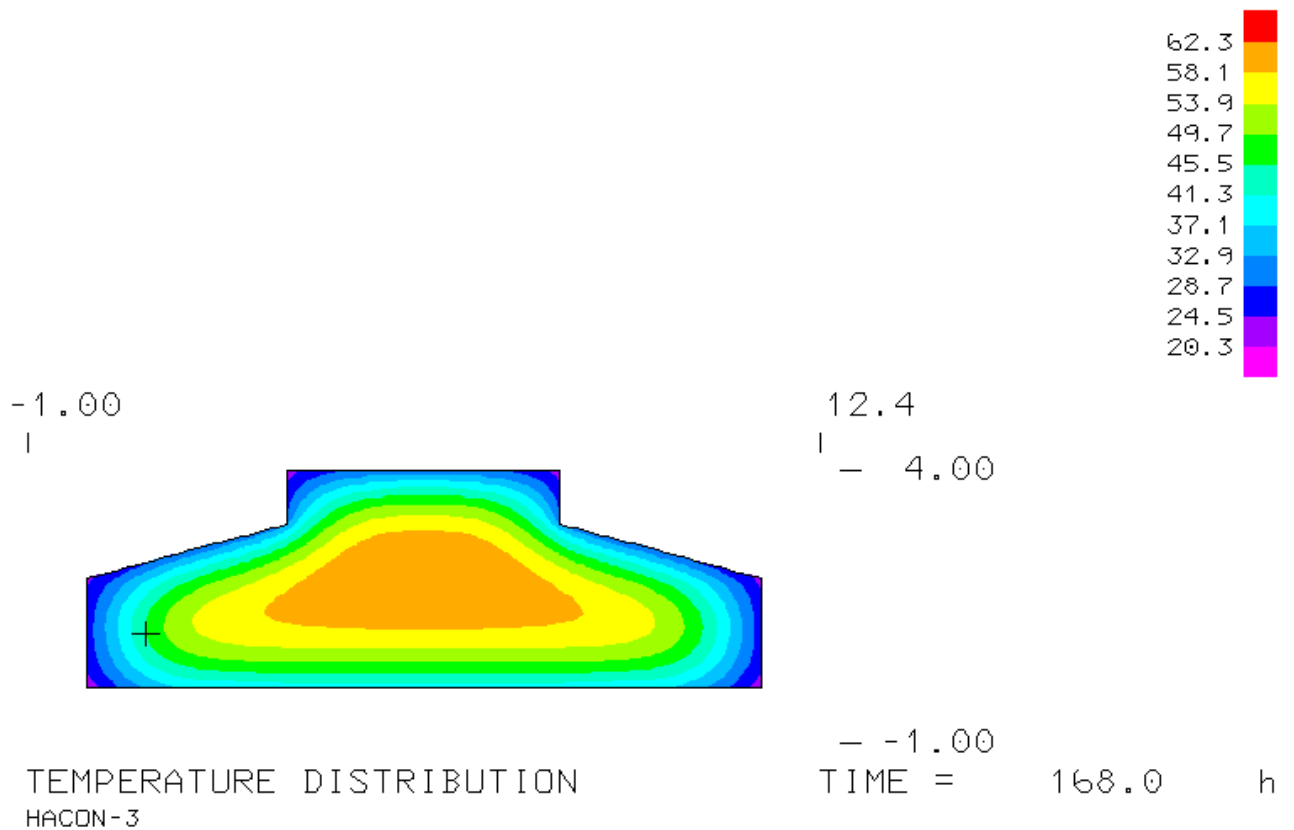
44 pav. Maksimali temperatūra, gauta neušinto modelio simuliacijos metu



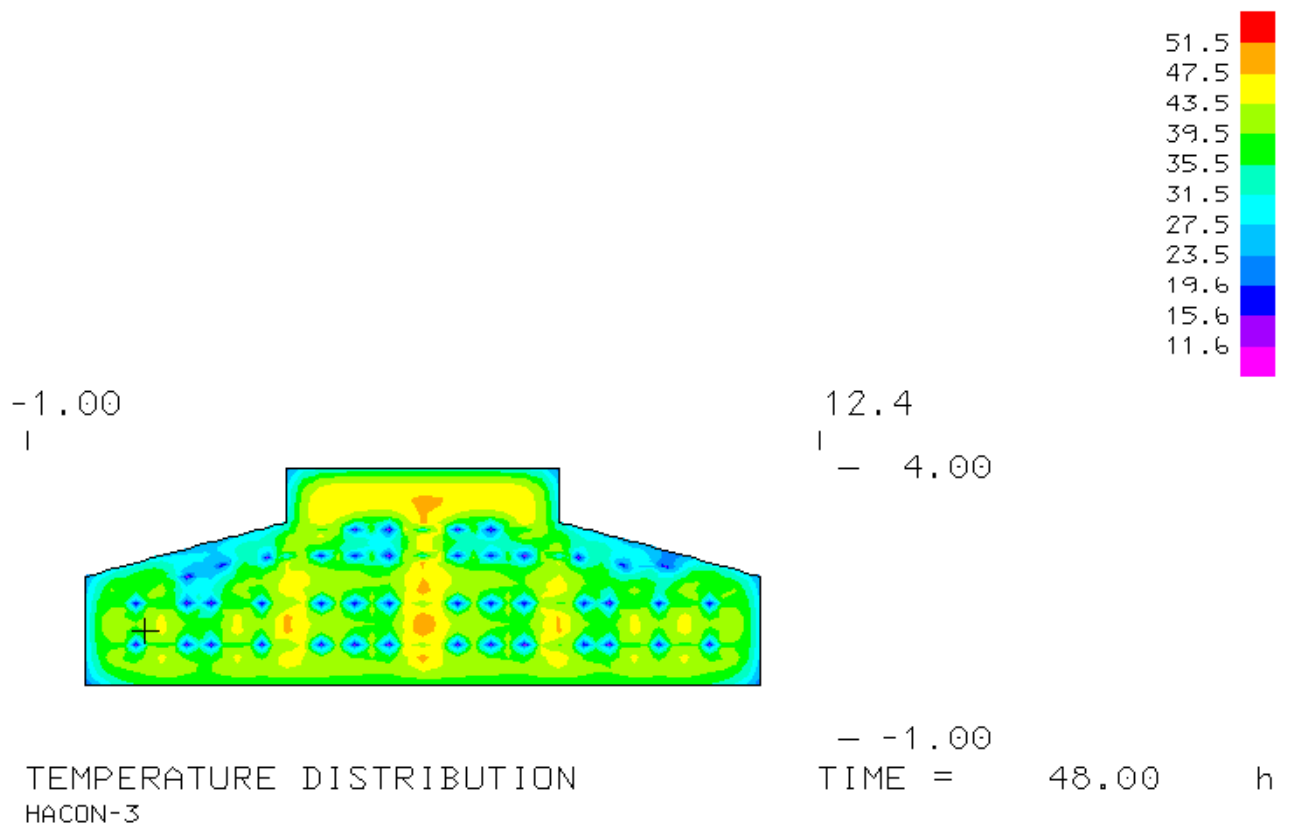
45 pav. Maksimali temperatūra, gauta modelio aušinto stambesniais užpildais simuliacijos metu



46 pav. Maksimali temperatūra, gauta modelio aušinto atšaldytas užpildais simuliacijos metu

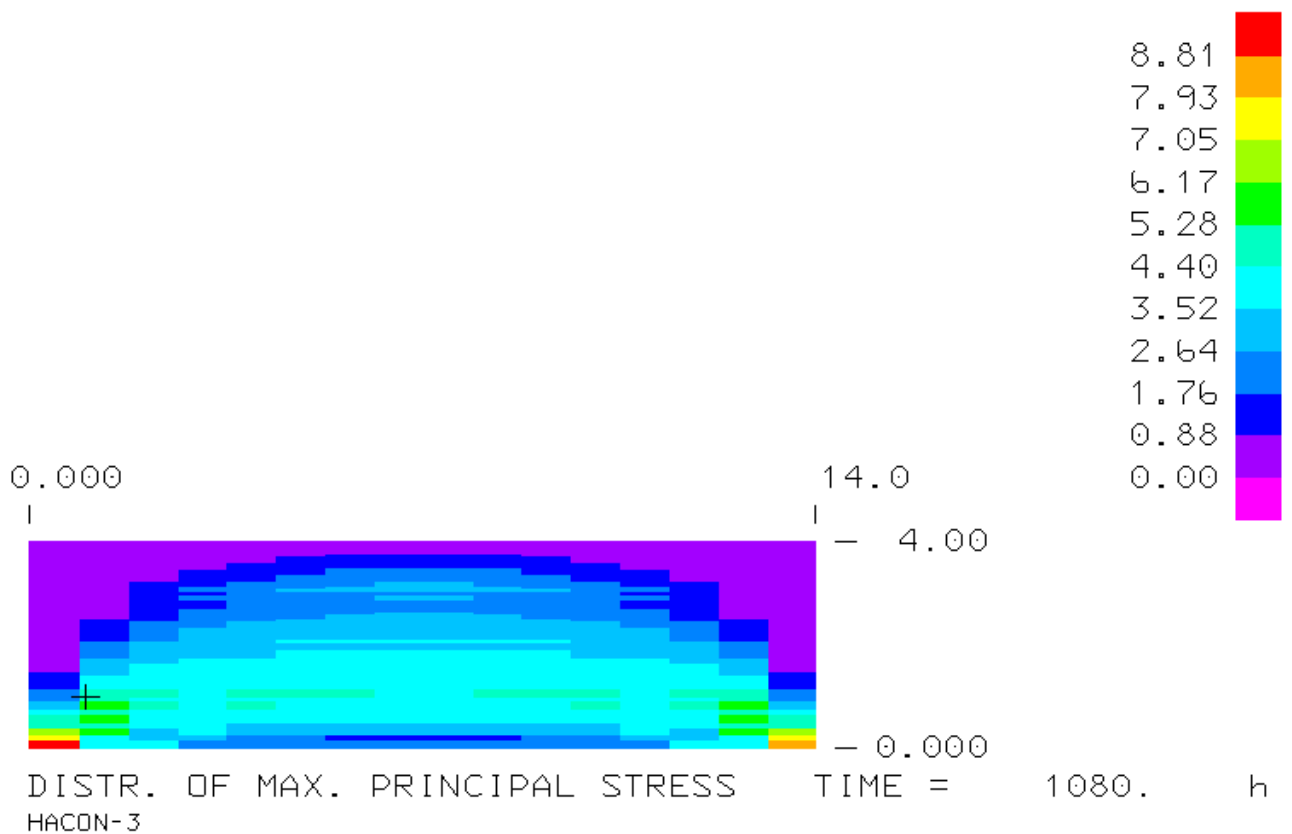


47 pav. Maksimali temperatūra, gauta modelio aušinto ledu simuliacijos metu

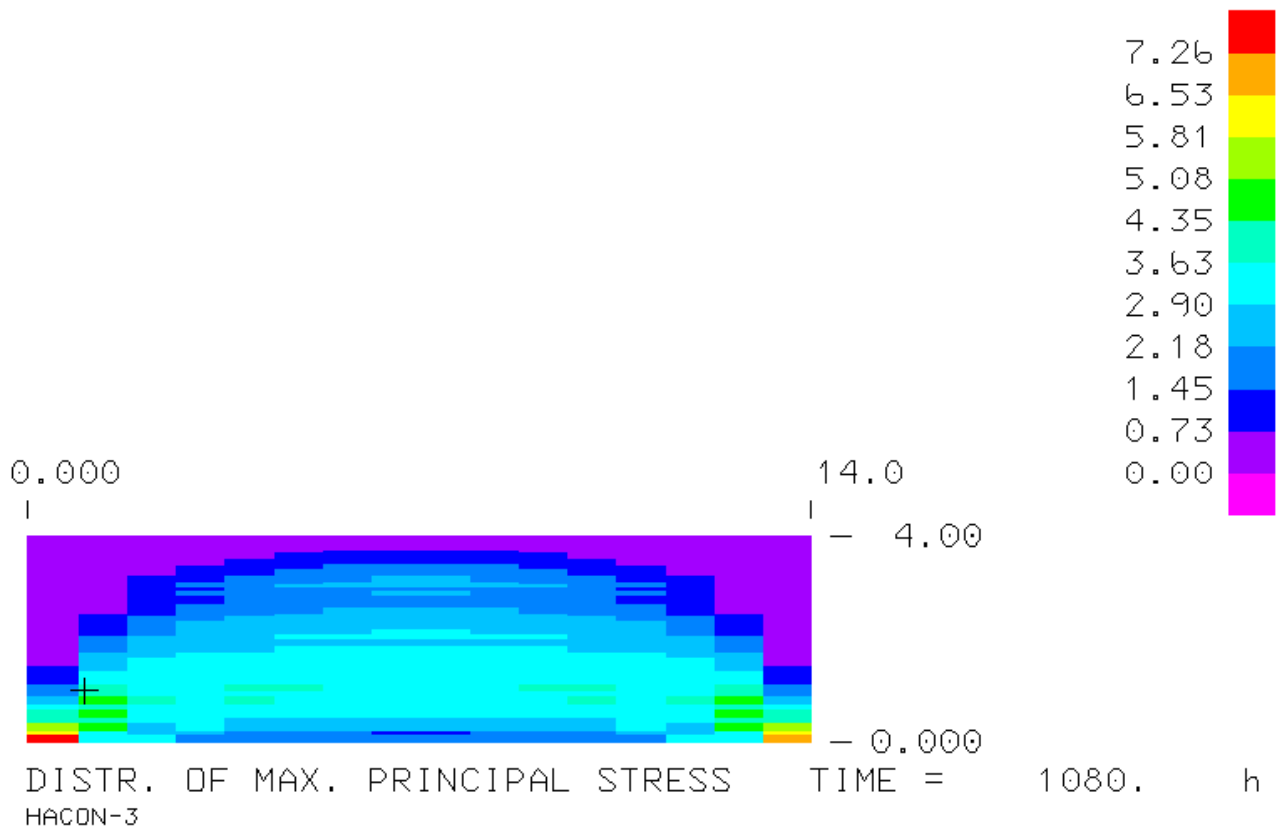


48 pav. Maksimali temperatūra, gauta modelio aušinto vamzdžiais simuliacijos metu

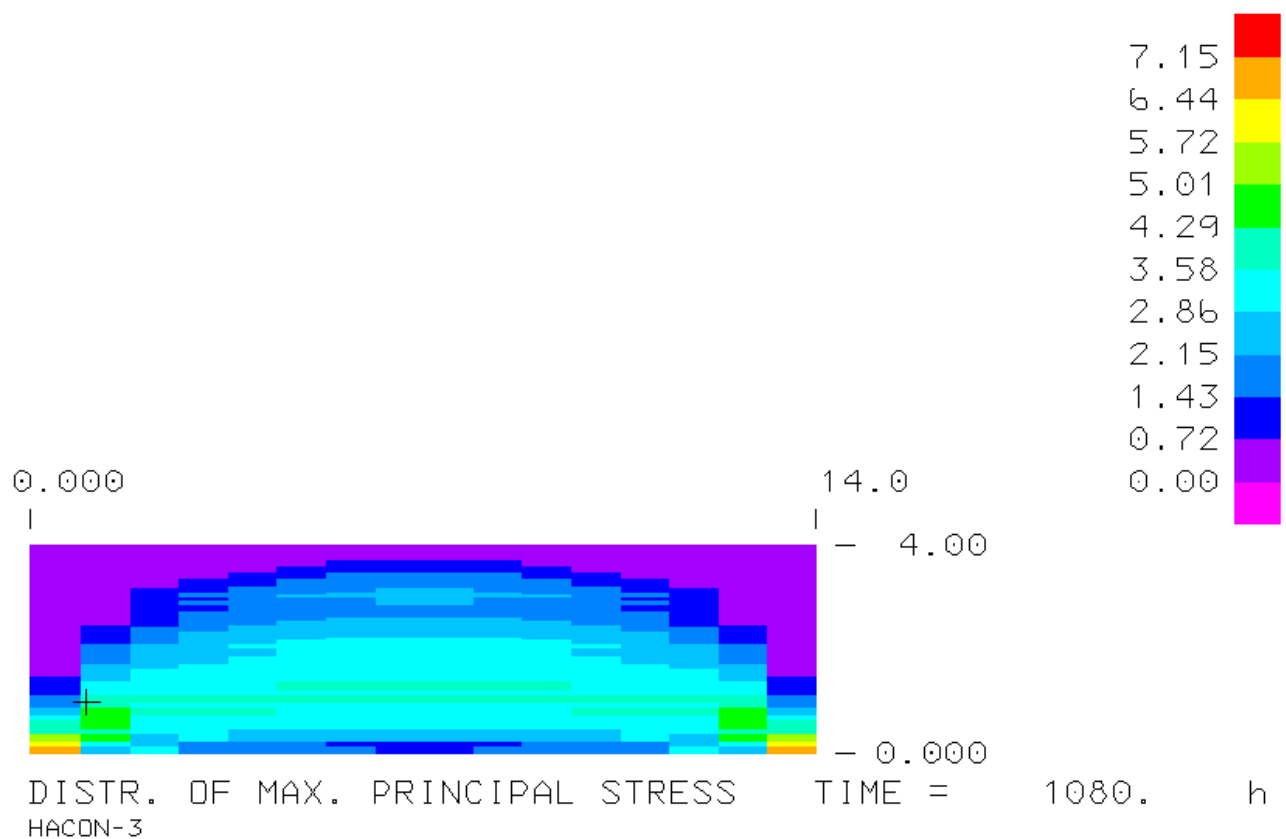
3. Priedas. Didžiausi pagrindiniai įtempiai plokštumos pjūvyje, gauti skirtingų HACON 3 simuliacijų metu



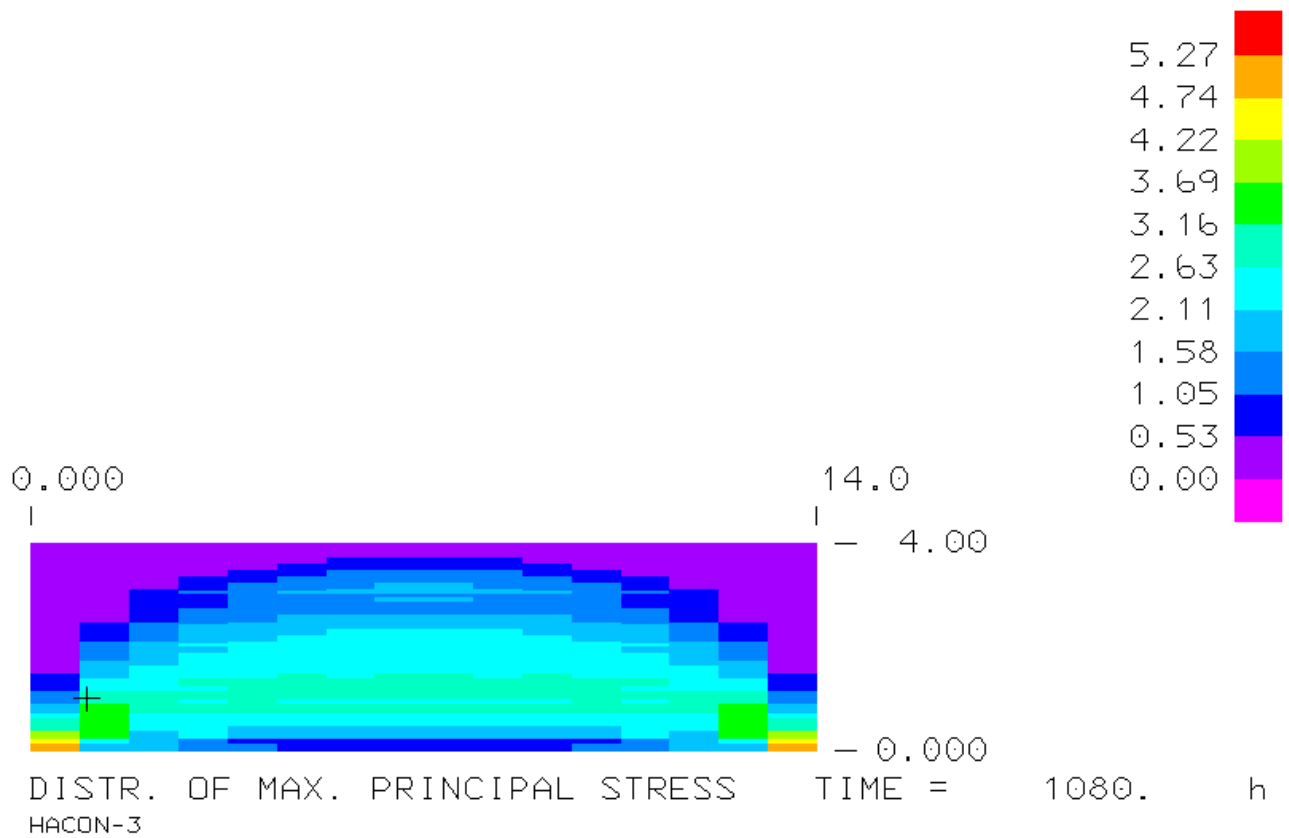
49 pav. Didžiausias pagrindinis įtempis neaušinamo modelio simuliacijos metu



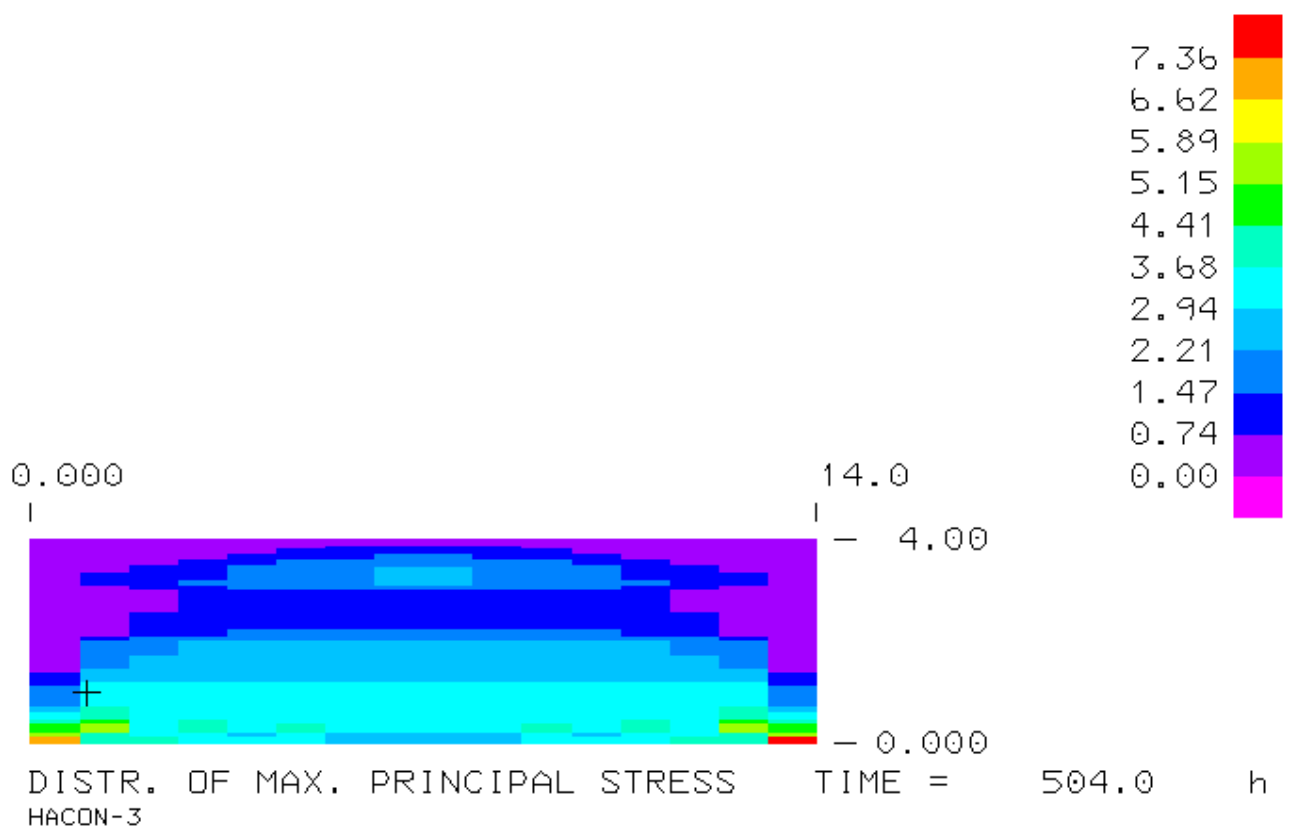
50 pav. Didžiausias pagrindinis įtempis stambesniais užpildais aušinto modelio simuliacijos metu



51 pav. Didžiausias pagrindinis įtempis atšaldytais užpildais aušinto modelio simuliacijos metu

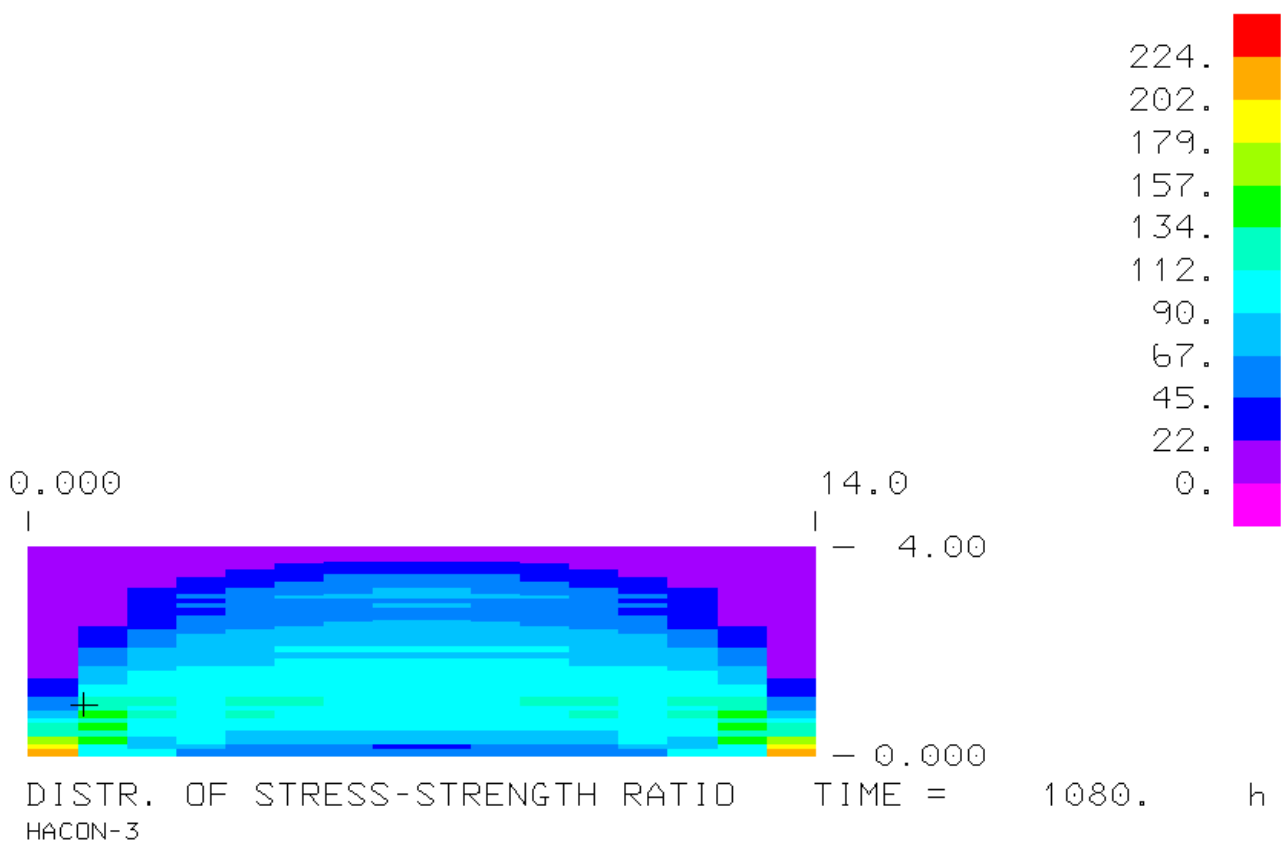


52 pav. Didžiausias pagrindinis įtempis ledu aušinto modelio simuliacijos metu

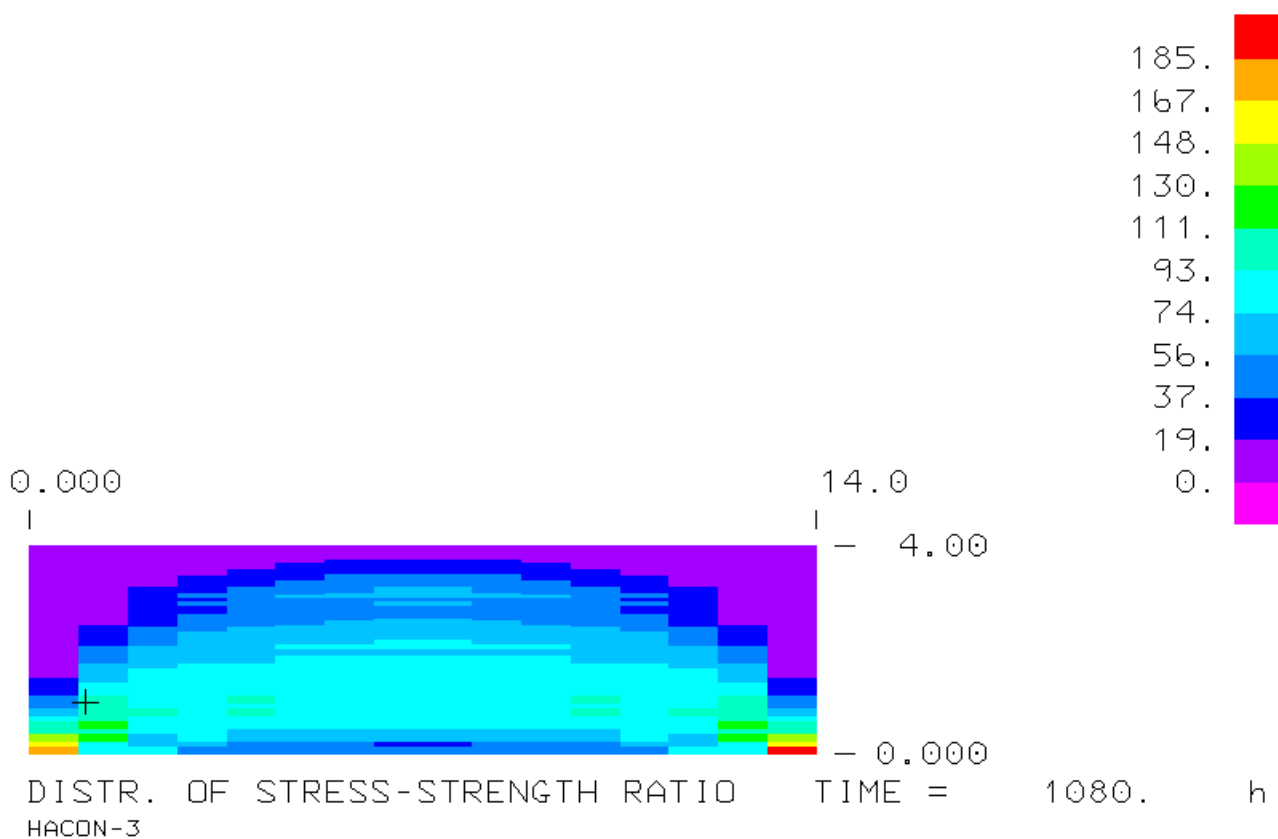


53 pav. Didžiausias pagrindinis įtempis vamzdeliais aušinto modelio simuliacijos metu

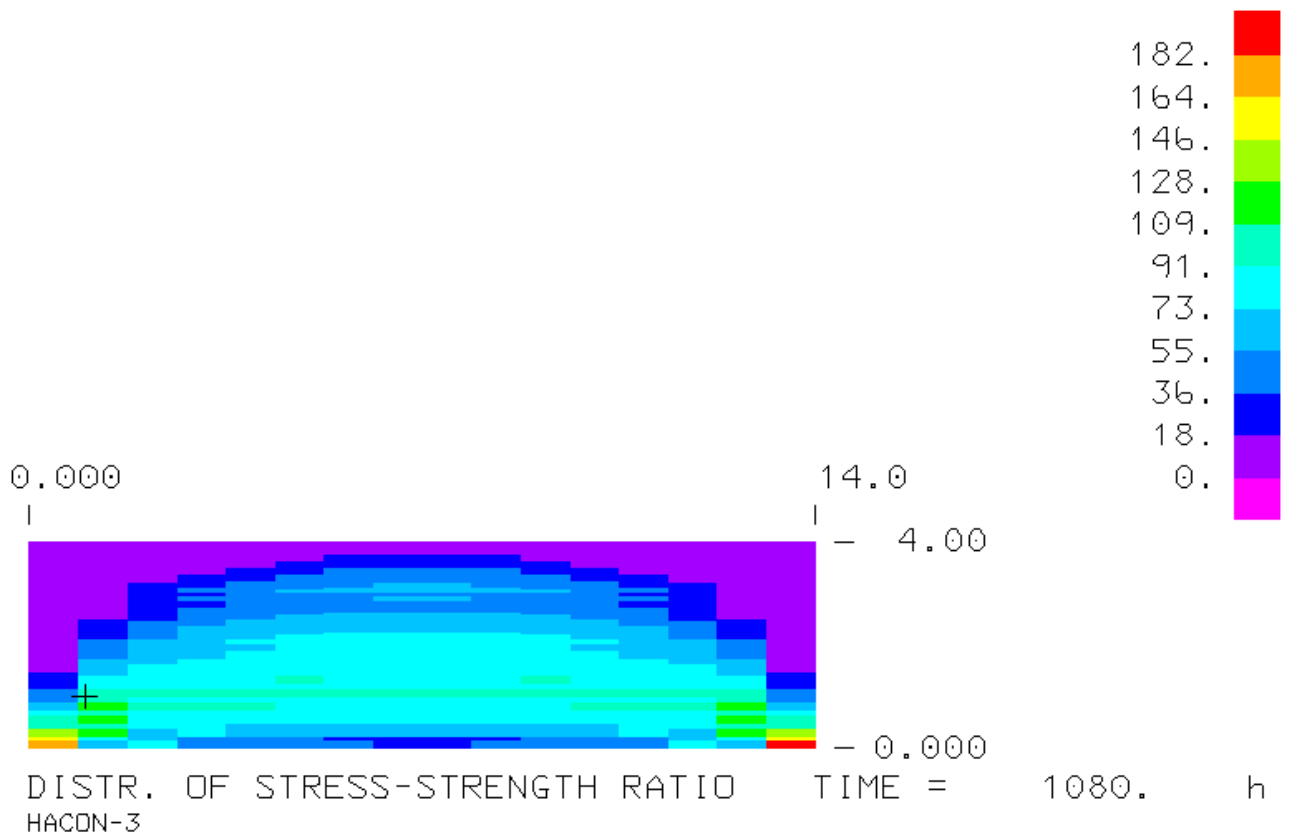
4. Priedas. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas plokštumos pjūvyje, gautas skirtingų HACON 3 simuliacijų metu



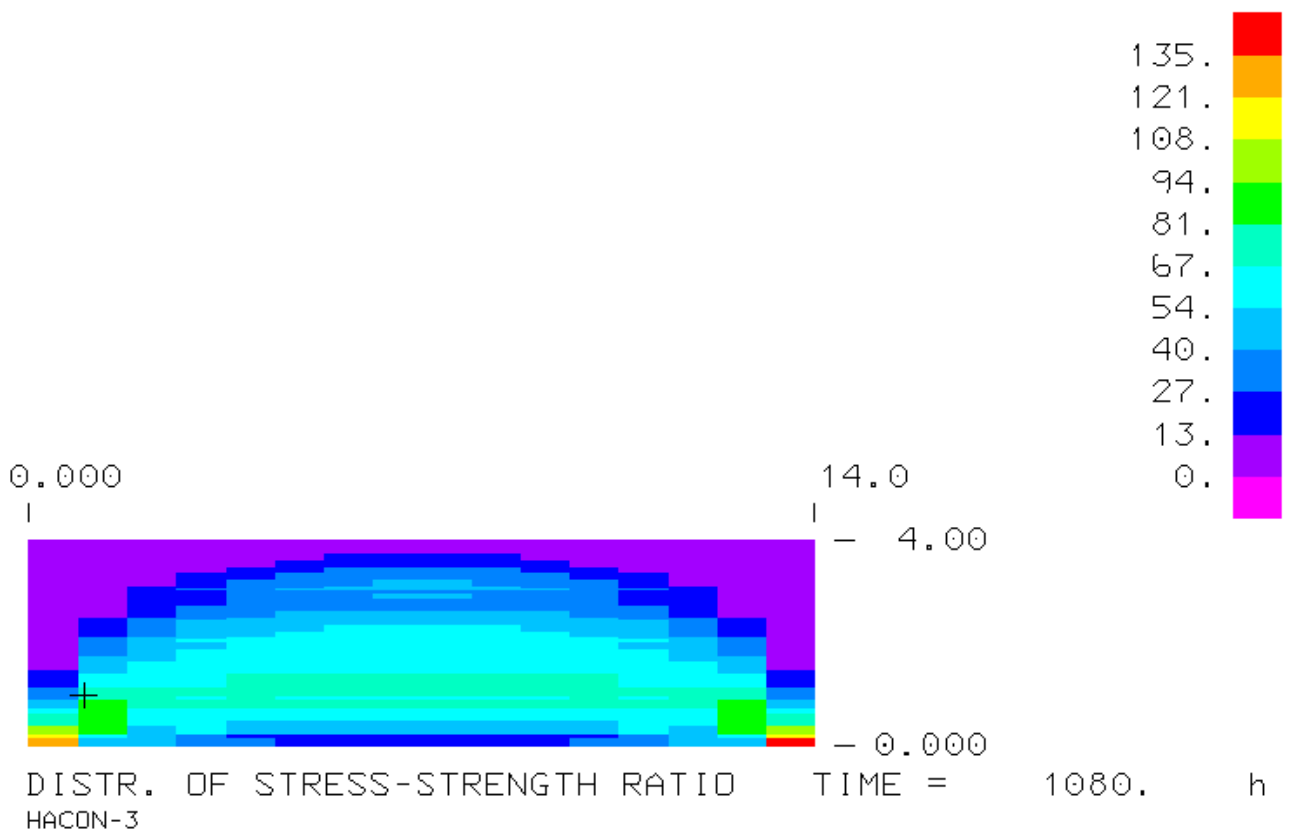
54 pav. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas neaušinto modelio simuliacijos metu



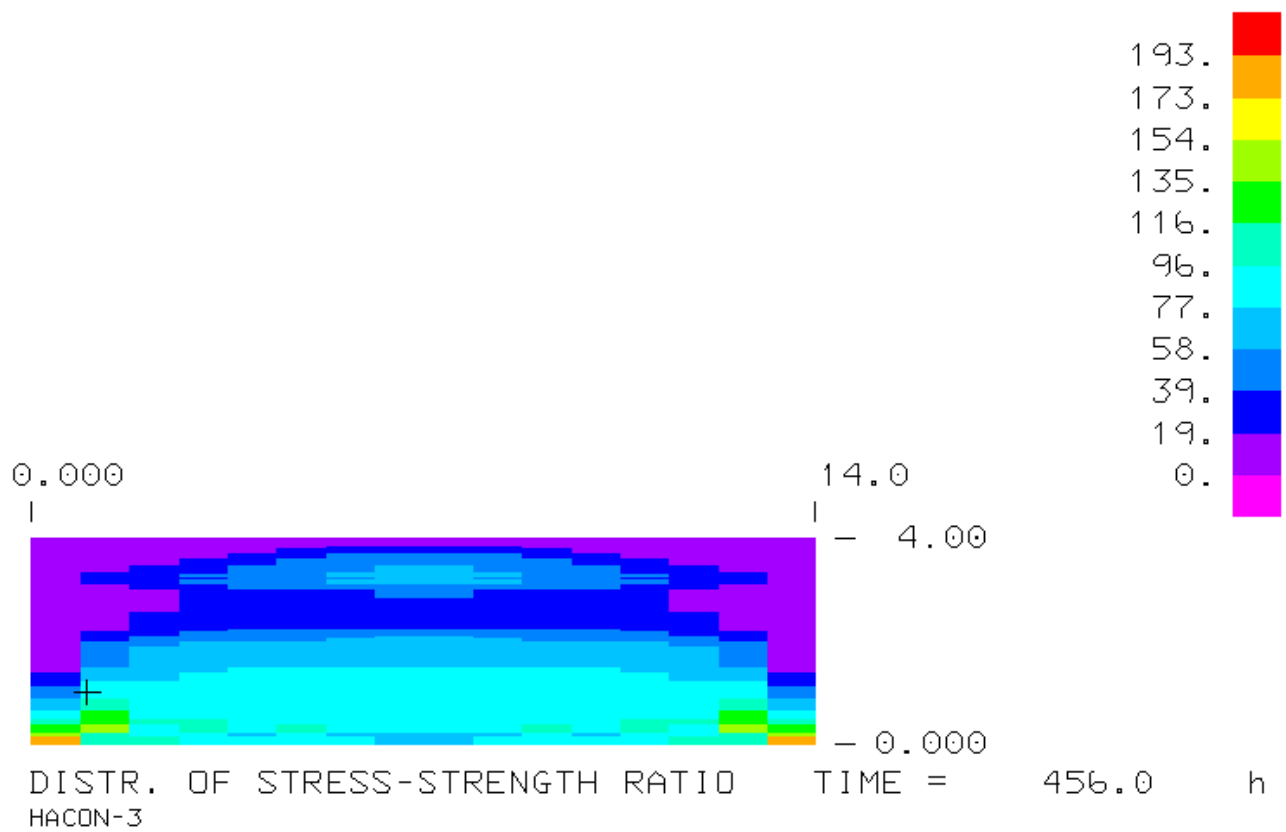
55 pav. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas stambesniais užpildais aušinto modelio simuliacijos metu



56 pav. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas atšaldytais užpildais aušinto modelio simuliacijos metu



57 pav. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas ledu aušinto modelio simuliacijos metu



58 pav. Įtempių ir stiprio santykio pasiskirstymas vamzdeliais aušinto modelio simuliacijos metu

5. Priedas. Skaitinės vertės, gautos HACON 3 simuliacijų metu, naudotos diagramoms sudaryti

4 lentelė. Temperatūrinės raidos vertės

Laikas (h)	Neaušinamas modelis (°C)	Modelis aušintas vamzdeliais (°C)	Modelis su stambiais užpildais (°C)	Modelis su atšaldytais užpildais (°C)	Modelis aušintas ledu (°C)
0	15	15	15	15	15
12	27,1	26,7	25,5	21,2	20
24	48,5	45	43,1	39,4	27,1
36	58,2	51,2	51,6	51,3	40,3
48	62,4	51,5	55,5	56,8	48,3
60	65,6	49,6	58,3	59,9	52,7
72	67,7	48,4	60,2	62,5	55,3
84	69	46,4	61,5	64,1	57,5
96	70	44	62,4	65,3	59,1
108	70,6	41,5	63	66,1	60,2
120	71	39	63,4	66,6	61
144	71,4	34,3	63,8	67,2	62
168	71,2	30,3	63,8	67,3	62,3
192	70,7	26,9	63,4	66,9	62,2
216	69,9	24,9	62,7	66,3	61,8
240	68,9	23,7	61,9	65,4	61,2
264	67,8	22,8	61	64,5	60,4
288	66,6	22,6	60	63,4	59,6
312	65,3	22,5	58,9	62,2	58,6
336	64	22,3	57,8	61,1	57,6
360	62,8	22,2	56,8	59,9	56,6
384	61,5	22	55,7	58,8	55,5
408	60,2	21,8	54,6	57,6	54,5
432	59	21,7	53,6	56,5	53,5
456	57,8	21,5	52,6	55,4	52,6
480	56,6	21,3	51,6	54,3	51,6
504	55,5	21,2	50,6	53,3	50,7
528	54,4	21	49,7	52,3	49,7
552	53,4	20,9	48,8	51,3	48,9
576	52,4	20,9	47,9	50,4	48
600	51,4	20,8	47,1	49,5	47,2
624	50,5	20,7	46,3	48,6	46,4
648	49,6	20,6	45,5	47,7	45,6
672	48,7	20,6	44,8	46,9	44,9

696	47,8	20,5	44,1	46,1	44,2
720	47	20,5	43,4	45,4	43,5
744	46,3	20,4	42,7	44,7	42,8
768	45,5	20,4	42,1	44	42,2
792	44,8	20,3	41,5	43,3	41,6
816	44,1	20,3	40,9	42,7	41
840	43,5	20,2	40,3	42,1	40,4
864	42,8	20,2	39,8	41,5	39,9
888	42,2	20,2	39,3	40,9	39,3
912	41,7	20,2	38,8	40,4	38,8
936	41,1	20,1	38,3	39,9	38,4
960	40,6	20,1	37,8	39,4	37,9
984	40,1	20,1	37,4	38,9	37,5
1008	39,6	20,1	37	38,4	37,1
1032	39,2	20,1	36,6	38	36,7
1056	38,7	20,1	36,2	37,6	36,3
1080	38,3	20,1	35,9	37,2	35,9

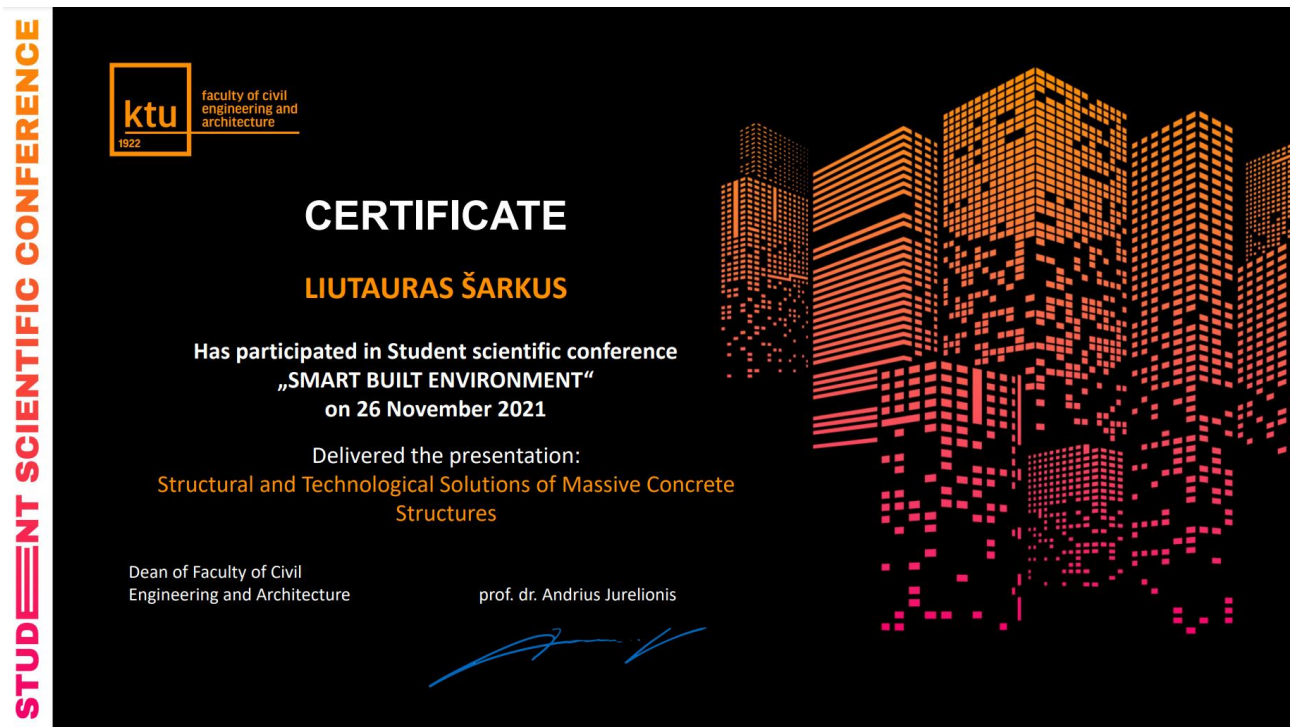
5 lentelė. Įtempių ir stiprio santykio vertės

Laikas (h)	Neaušinamas modelis (%)	Modelis aušintas vamzdeliais (%)	Modelis su stambiais užpildais (%)	Modelis su atšaldytais užpildais (%)	Modelis aušintas ledu (%)
0	0,94	0,5719	0,7765	0,01758	0,8157
12	8,75	3,243	7,44	5,241	2,136
24	17,38	6,856	15,07	17,94	12,21
36	16,91	6,393	14,65	17,29	17,28
48	16,05	5,606	13,97	16,64	16,91
60	15,07	4,781	13,15	15,76	16,32
72	14,12	5,934	12,34	14,87	15,61
84	13,21	15,66	11,57	14,03	14,89
96	12,37	25,25	10,85	13,23	14,2
108	11,58	33,79	10,18	12,48	13,54
120	10,07	47,41	8,888	10,99	12,14
144	8,371	57,92	7,74	9,686	10,91
168	7,514	65,96	6,697	8,508	9,814
192	6,402	72,1	5,737	7,423	8,801
216	5,408	76,77	4,863	6,415	7,854
240	4,448	80,34	3,986	5,381	6,879
264	3,94	83,06	3,334	4,467	5,988
288	5,173	85,13	3,322	3,712	5,18

312	9,688	86,71	5,607	3,259	4,446
336	15,31	87,91	9,969	3,974	3,78
360	21,02	88,83	14,7	7,554	3,202
384	26,61	89,53	19,39	12,34	2,796
408	32,02	90,06	23,95	17,23	2,995
432	37,23	90,47	28,36	22	5,182
456	42,24	90,77	32,6	26,62	8,85
480	47,04	90,92	36,66	31,06	12,74
504	51,63	88,35	40,56	35,32	16,57
528	56,03	85,59	44,29	39,4	20,28
552	60,24	83,11	47,86	43,31	23,85
576	64,26	80,86	51,28	47,05	27,27
600	68,1	78,81	54,55	50,63	30,56
624	71,77	76,93	57,67	54,06	33,7
648	75,27	75,22	60,65	57,33	36,71
672	78,62	73,64	63,5	60,46	39,59
696	81,82	72,2	66,23	63,45	42,35
720	84,88	70,87	68,84	66,31	44,99
744	87,8	69,65	71,33	69,04	47,52
768	90,59	68,52	73,71	71,65	49,93
792	93,26	67,49	75,99	74,15	52,24
816	95,81	66,54	78,17	76,54	54,46
840	98,25	65,66	80,25	78,83	56,58
864	100,6	64,86	82,25	81,02	58,6
888	102,8	64,12	84,16	83,11	60,55
912	105	63,44	85,99	85,12	62,41
936	107	62,81	87,74	87,04	64,19
960	109	62,23	89,42	88,88	65,9
984	112	61,7	91,03	90,65	67,54
1008	112,6	61,22	92,57	92,34	69,11
1032	114,4	60,77	94,05	93,97	70,62
1056	114,4	60,36	95,47	95,52	72,07
1080	38,3	20,1	35,9	37,2	35,9

6. Priedas. Sertifikatas, įrodantis dalyvavimą konferencijoje „Smart Built Environment“

Šio darbo rezultatai buvo skelbti studentų mokslinėje konferencijoje „SMART BUILT ENVIRONMENT“, kuri vyko Lapkričio 26 dieną, 2021.



59 pav. „Smart Built Environment“ konferencijos dalyvio sertifikatas